





دانشکده : عمران و معماری

گروه عمران

مقایسه مدل های آشفته گی مختلف جهت شبیه سازی عددی جریان در سرریز جانبی

دانشجو : حسین مرشدلو

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۹۳

تقدیم به پدر و مادرم :

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسبیم ساخته تا در سایه درخت پر بار
وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش
نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو
وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از
فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

تشکر و قدردانی :

خداوند یکتا را سپاس می گویم که به من امکان داد تا بتوانم این مرحله از تحصیل خود را نیز با موفقیت پشت سر بگذارم.

در اینجا لازم می دانم از استاد راهنمای بزرگووارم دکتر رامین امینی که همواره و در تمامی مراحل، من را یاری و راهنمایی نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

در انتها از کمک های بی دریغ و راهنمایی های ارزنده پدر و مادرم تشکر و قدردانی می کنم.

تعهد نامه

اینجانب حسین مرشدلو دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - هیدرولیک دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مقایسه مدل های آشفتگی مختلف جهت شبیه سازی عددی جریان در سرریز جانبی تحت راهنمایی دکتر رامین امینی به عنوان استاد راهنما 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام 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 صنعتی 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

سرریزهای جانبی به طور گسترده ای در مهندسی هیدرولیک، آبیاری، و کاربردهای مهندسی محیط برای تنظیم و اندازه گیری جریان، مورد استفاده قرار می گیرند. جریان در سرریز جانبی مثالی از جریان متغیر مکانی (SVF) با کاهش دبی می باشد. جریان خروجی از سرریز جانبی به دلیل تغییرات در پروفیل سطح جریان به صورت سه بعدی می باشد. مطالعه ی حاضر به سرریز جانبی مستطیلی قرار گرفته در کانال افقی مستطیلی با ارتفاع آب پایه ی صفر محدود می گردد. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت به شبیه سازی سرریز جانبی پرداخته و در این شبیه سازی از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ ، $k-\epsilon$ RNG، استفاده شده است. برای تحلیل سطح آزاد جریان از مدل شبیه سازی جریان چند فازی حجم سیال (VOF) استفاده کرده. هدف از تحقیق حاضر تعیین پارامترهای مختلف جریان از قبیل توزیع بردارهای سرعت، پروفیل سطح جریان، ناحیه ی جدایی جریان، ناحیه ی رکود، و صفحه تقسیم کننده جریان، با استفاده از مدل های آشفتگی ذکر شده، و تعیین مدل آشفتگی بهینه می باشد. برای صحت سنجی نتایج حاصل از مدل های عددی با مدل آزمایشگاهی دانشگاه کنکوردیا مقایسه شد. در تعیین اکثر پارامترهای جریان برای سرریز جانبی، تمام مدل های آشفتگی توانستند نتایج قابل قبولی ارائه دهند. تفاوت نتایج این مدل ها بیشتر در تعیین ناحیه جدایی جریان مشهود بود که مدل $k-\epsilon$ اصلاً موفق به انجام این کار نشد و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG تنها توانست نقطه ابتدایی و عرض ناحیه جدایی جریان را تعیین کند.

اما مدل $k-\omega$ توانست به خوبی ناحیه جدایی جریان را شبیه سازی کند و در مقایسه با مدل آزمایشگاهی نتایج قابل قبولی را ارائه دهد.

کلمات کلیدی :

سرریز جانبی، مدل آشفتگی، پروفیل سطح آزاد جریان، انسیس فلوئنت، روش حجم سیال (VOF)

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱ سرریز جانبی ۲
- ۲-۱ جریان متغیر مکانی ۲
- ۳-۱ اهداف پایان نامه ۳
- ۴-۱ طرح بندی پایان نامه ۴

فصل دوم : تئوری جریان های متغیر مکانی و مروری بر مطالعات پیشین

- ۱-۲ مقدمه ۸
- ۲-۲ تئوری جریان متغیر مکانی ۸
 - ۱-۲-۲ تعریف ۸
 - ۱-۲-۲-۱ جریان متغیر مکانی با افزایش دبی ۹
 - ۲-۱-۲-۲ جریان متغیر مکانی با کاهش دبی ۱۰
 - ۲-۲-۲ روابط حاکم بر جریان در سرریز جانبی ۱۲
 - ۱-۲-۲-۲ روش معادله انرژی ۱۲
 - ۲-۲-۲-۲ روش معادله اندازه حرکت ۱۳
 - ۳-۲-۲ پروفیل جریان روی سرریز جانبی ۱۵

۳-۲	مروری بر مطالعات پیشین	۱۷
۱-۳-۲	مطالعات تحلیلی	۱۷
۲-۳-۲	مطالعات آزمایشگاهی	۲۰
۳-۳-۲	مطالعات عددی	۲۱
۴-۳-۲	مطالعات مربوط به مدلسازی آشفته‌گی جریان	۲۲

فصل سوم : مدلسازی جریان آشفته

۱-۳	مقدمه	۲۴
۲-۳	معادلات حاکم بر جریان آشفته	۲۶
۱-۲-۳	معادله متوسط رینولدز ناویر استوکس	۲۶
۲-۲-۳	معادله انرژی آشفته‌گی	۲۹
۳-۳	مدل های آشفته‌گی	۲۹
۱-۳-۳	تعریف	۲۹
۱-۱-۳-۳	مدل های صفر معادله ای	۳۰
۲-۱-۳-۳	مدل های تک معادله ای	۳۲
۳-۱-۳-۳	مدل های دو معادله ای	۳۳
۴-۱-۳-۳	مدل های انتقال تنش	۳۴
۲-۳-۳	مدل $k-\varepsilon$	۳۵

۳۵.....	مدل $k-\varepsilon$ استاندارد
۳۷.....	مدل $k-\varepsilon$ RNG
۳۸	مدل $k-\omega$ استاندارد
۴۰.....	قانون دیوار
۴۳.....	مدل کردن نواحی نزدیک دیوار
۴۴.....	تابع استاندارد دیوار
۴۶.....	روش VOF

فصل چهارم : شبیه سازی عددی

۵۰	۱-۴ مقدمه
۵۰	۲-۴ دینامیک سیالات محاسباتی
۵۲	۳-۴ مدل آزمایشگاهی
۵۳	۴-۴ آشنایی با انسیس فلوئنت
۵۴	۵-۴ هندسه مدل عددی
۵۶	۶-۴ تنظیمات حل
۵۶	۱-۶-۴ تعیین مدل چند فازی و مدل آشفستگی
۵۷	۲-۶-۴ شرایط مرزی
۵۷	۱-۲-۶-۴ شرایط مرزی سرعت ورودی

۵۹	 ۲-۲-۶-۴ شرایط مرزی فشار خروجی و فشار ورودی
۶۰	 ۳-۲-۶-۴ شرایط مرزی دیوار
۶۱	 ۳-۶-۴ روش های حل و گسسته سازی معادلات
۶۱	 ۱-۳-۶-۴ روش های حل عددی
۶۲	 ۲-۳-۶-۴ گسسته سازی معادله انتقالی کلی
۶۴	 ۳-۳-۶-۴ روش های اعمال شده در مدل
۶۶	 ۳-۶-۴ شرایط اولیه

فصل پنجم : تجزیه تحلیل نتایج

۷۰	 ۱-۵ مقدمه
۷۱	 ۲-۵ بی بعد سازی پارامترها
۷۲	 ۳-۵ مقایسه نقطه سکون
۷۲	 ۱-۳-۵ مقایسه بین مدل تئوری و آزمایشگاهی
۷۴	 ۲-۳-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و عددی
۸۰	 ۴-۵ مقایسه پروفیل سطح جریان
۸۴	 ۵-۵ صفحه تقسیم کننده جریان
۸۵	 ۶-۵ ناحیه جدایی جریان
۸۸	 ۷-۵ مقایسه بین دبی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری ۹۲

۶-۲ پیشنهادات ۹۴

مراجع ۹۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ : کانال روباز مستطیلی شامل سرریز جانبی ۵
- شکل ۲-۱ : مشخصات جریان روی سرریز جانبی ۵
- شکل ۱-۲ : جریان متغیر مکانی با افزایش دبی در کانال سرریز جانبی سد ۱۰
- شکل ۲-۲ : شکل شماتیک سرریز جانبی (الف) مقطع طولی ، (ب) پلان ۱۱
- شکل ۳-۲ : مشخصات جریان در سرریز جانبی برای حل معادله اندازه حرکت ۱۴
- شکل (۲-۴ الف) : پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی برای جریان زیر بحرانی ۱۶
- شکل (۲-۴ ب) : پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی برای جریان فوق بحرانی ۱۶
- شکل (۲-۴ ج) : پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی برای پرش هیدرولیکی ۱۶
- شکل ۵-۲ : جریان روی سرریز جانبی (ارتفاع آب پایه صفر) (a) نمای پلان (b) نمای کنار ۱۸
- شکل ۶-۲ : پروفیل های مختلف جریان در طول سرریز جانبی در مطالعات فریزر ۱۹
- شکل ۱-۳ : سرعت وابسته به زمان سیال در نقطه ۲۵
- شکل ۲-۳ : متوسط زمانی برای آشفستگی ایستا ۲۶
- شکل ۳-۳ : تقسیم بندی منطقه نزدیک دیوار ۴۲
- شکل ۴-۳ : رفتار نزدیک دیوار ۴۳
- شکل ۱-۴ : کانال روباز مستطیلی شامل سرریز جانبی ۵۲
- شکل ۲-۴ : طرح شماتیک از کانال با سرریز جانبی مستطیلی (آب پایه صفر) ۵۳

- شکل ۳-۴ : شبکه بندی مدل ۵۵
- شکل ۴-۴ : تنظیمات مدل چند فازی ۵۶
- شکل ۵-۴ : تنظیمات مدل آشفته گی ۵۷
- شکل ۶-۴ : تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز مختلط ۵۸
- شکل ۷-۴ : تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم ۵۹
- شکل ۸-۴ : تنظیمات شرایط مرزی فشار خروجی ۵۹
- شکل ۹-۴ : تنظیمات شرایط مرزی دیوار ۶۰
- شکل ۱۰-۴ : حجم کنترلی که برای نشان دادن گسسته سازی یک معادله انتقال اسکالر ۶۳
- شکل ۱۱-۴ : ضرایب زیر تخفیف در مدل عددی حاضر ۶۴
- شکل ۱-۵ : مشخصات سرریز از نمای کناری ۷۱
- شکل ۲-۵ : مشخصات سرریز برای مدل تئوری ۷۳
- شکل ۳-۵ : مشخصات سرریز برای مدل آزمایشگاهی ۷۳
- شکل ۴-۵ (الف و ب) : ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0/209$ ۷۵
- شکل ۴-۵ (ج و د) : ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0/209$ ۷۶
- شکل ۵-۵ (الف و ب) : ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0/244$ ۷۸
- شکل ۵-۵ (ج و د) : ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0/244$ ۷۹
- شکل ۶-۵ : مقاطع مشخص شده برای نشان دادن پروفیل سطح آب ۸۱

- شکل ۷-۵ : مقاطع پروفیل سطح آب در عرض کانال ۸۲
- شکل ۸-۵ : مقاطع پروفیل سطح آب در امتداد کانال ۸۳
- شکل ۹-۵ : صفحه تقسیم کننده جریان در مدل آزمایشگاهی ۸۵
- شکل ۱۰-۵ (الف و ب) : خطوط جریان در کانال در ارتفاع $Z^* = 0/209$ ۸۷
- شکل ۱۰-۵ (ج) : خطوط جریان در کانال در ارتفاع $Z^* = 0/209$ ۸۸
- شکل ۱۱-۵ : میزان دبی ورودی و خروجی در مدل عددی ۸۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۴ : ابعاد شبکه بندی ۵۵
- جدول ۱-۵ : مقادیر اندازه گیری شده برای نقطه سکون در $Z^* = 0/209$ ۷۴
- جدول ۲-۵ : مقادیر اندازه گیری شده برای نقطه سکون در $Z^* = 0/244$ ۷۷
- جدول ۳-۵ : میزان خطا پروفیل سطح آب برای هر مدل آشفتگی ۸۱
- جدول ۴-۵ : درصد مقادیر اندازه گیری شده برای ناحیه جدایی جریان ۸۶
- جدول ۵-۵ : مشخصات جریان مدل آزمایشگاهی و جریان مدل عددی ۹۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱ سرریز جانبی

در مقطعی از رودخانه ها، کانال های آبیاری و زهکشی و یا کانال های انتقال فاضلاب ممکن است جریان بیشتر از دبی ظرفیت مجرا شود. این پدیده به دلایل مختلف ممکن است اتفاق بیافتد. به عنوان مثال در کانال های جمع آوری آب های سطحی و رودخانه ها افزایش ضریب رواناب (در اثر توسعه راه های ارتباطی یا گسترش مناطق شهری) باعث افزایش دبی بیش از ظرفیت مجاری آبرو می گردد. بنابراین جهت کنترل و حفظ رودخانه باید از سازه های کنترل دبی استفاده کرد. یکی از پر استفاده ترین این سازه ها ، سرریز جانبی می باشد. جریان روی سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی می باشد.

۱-۲ جریان متغیر مکانی

جریان متغیر مکانی، حالتی از جریان دائمی است که شدت جریان در جهت جریان و در طول مسیر افزایش یا کاهش می یابد. بدین ترتیب جریان مکانی به دو دسته جریان متغیر مکانی با افزایش دبی و جریان متغیر مکانی با کاهش دبی تقسیم می شود. از آنجا که به دلیل افزایش یا کاهش دبی در طول مسیر، مقدار انرژی جنبشی یا مقدار مومنوم جریان (اندازه حرکت) تغییر پیدا خواهد کرد، رفتار هیدرولیکی جریان متغیر مکانی در هر کدام از دو حالت افزایش دبی و کاهش دبی با یکدیگر تفاوت بسیاری دارد.

در جریان متغیر مکانی با افزایش دبی یک دبی فرعی به صورت جانبی به جریان اصلی کانال اضافه می شود، به هنگام افزایش دبی به علت عمل تلاطم ناشی از اختلاط دو جریان افت انرژی قابل ملاحظه ای به وجود می آید. با توجه به تغییر انرژی و پیچیده بودن مقدار آن برای بدست آوردن روابط این جریان از معادله اندازه حرکت استفاده می گردد. در این پژوهش جریان با کاهش دبی مطرح بوده و لذا به جریان نوع اول کمتر پرداخته می شود.

اما در جریان متغیر مکانی با کاهش دبی که اساساً یک جریان انشعابی است، تقسیم دبی در طول مسیر جریان انجام می گیرد. مطالعات تئوری و آزمایشگاهی زیادی به منظور بررسی تغییرات انرژی در طول جریان انشعابی انجام گرفته است.

مطالعات روی سرریز جانبی با کاهش دبی به دهه سوم قرن بیستم بر می گردد. یکی از پایه ای ترین معادلات در رابطه با هیدرولیک سرریز جانبی، معادله کلاسیک دیمارچی^۱ (۱۹۳۴) می باشد. مسئله اصلی در مطالعات وی تعیین ضریب شدت جریان بوده است [۱]. تلاش بسیاری از پژوهشگران پس از وی در جهت برآورد صحیح و دقیق دبی خروجی از این نوع سرریز ها بوده است. امروزه با استفاده از رایانه هایی با کارایی بالا و توسعه نرم افزار های قوی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۲، برای پژوهشگران ابزار تجزیه و تحلیل مناسبی فراهم شده است. این ابزار محاسباتی قادر به حل پیچیدگی های جریان می باشد [۲]. یکی از این ابزار های قدرتمند نرم افزار انسیس فلوئنت^۳ می باشد که با استفاده از روش حجم محدود اقدام به حل معادلات حاکم بر جریان می نماید.

۳-۱ اهداف پایان نامه

- ۱- شبیه سازی سه بعدی جریان در کانال روباز مستطیلی شامل یک سرریز جانبی با آب پایه صفر با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت (شکل ۱-۱)
- ۲- به دست آوردن مشخصات جریان روی سرریز جانبی (شکل ۲-۱)
- ۳- با توجه به ناحیه جدایی جریان و ایجاد آشفتگی در کانال، مدل های آشفتگی مختلف جهت تعیین مدل آشفتگی بهینه استفاده می شود.
- ۴- مقایسه بین نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

۱- De Marchi

۲- Computational Fluid Dynamics

۳- ANSYS FLUENT

۴-۱ طرح بندی پایان نامه

ادامه بحث در مورد سرریز جانبی در این پایان نامه به صورت زیر طبقه بندی می شود :

فصل دوم با بیان تئوری جریان متغیر مکانی شروع می شود و در ادامه به بیان روابط حاکم بر جریان در سرریز جانبی و انواع پروفیل های جریان روی سرریز جانبی می پردازیم و در انتها مطالعات پیشین مربوط به سرریز جانبی را بیان خواهیم کرد.

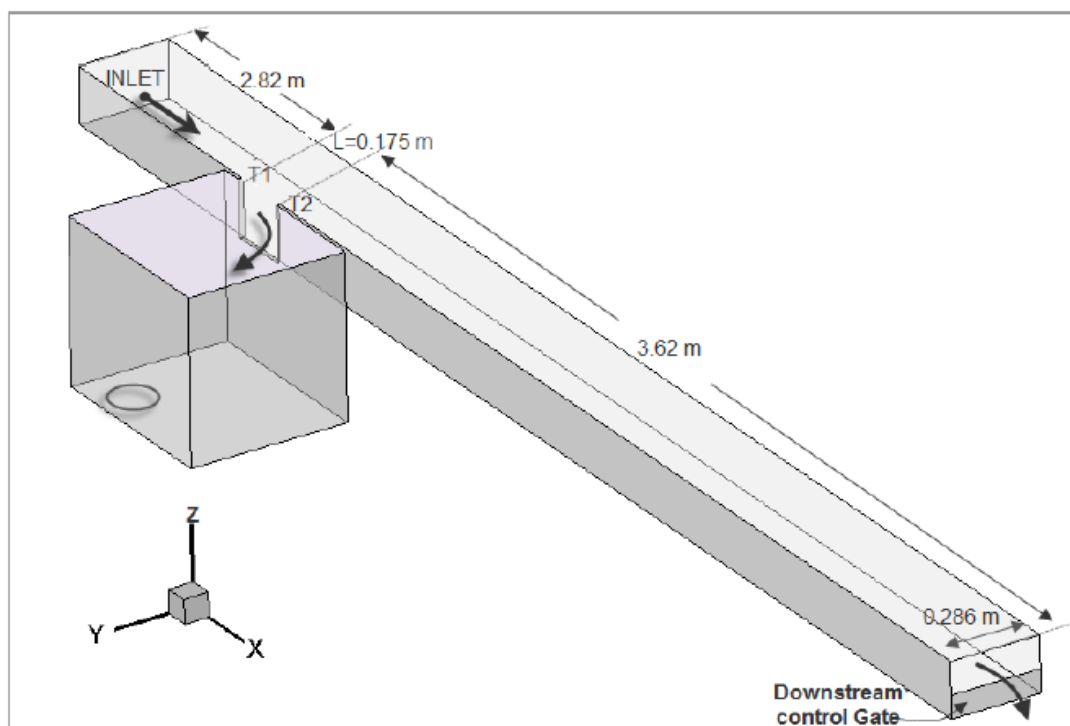
در فصل سوم به بیان معادلات حاکم بر جریان آشفته، معادلات آشفتگی استفاده شده در این تحقیق و معرفی روش حجم سیال (VOF^1) می پردازیم.

فصل چهارم با بیان فواید استفاده از مدل عددی شروع می شود و در ادامه به معرفی مدل آزمایشگاهی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، می پردازیم. در انتها به بیان چگونگی ساخت مدل عددی در انسیس فلونت و توضیح در مورد روش های حل مدل عددی می پردازیم.

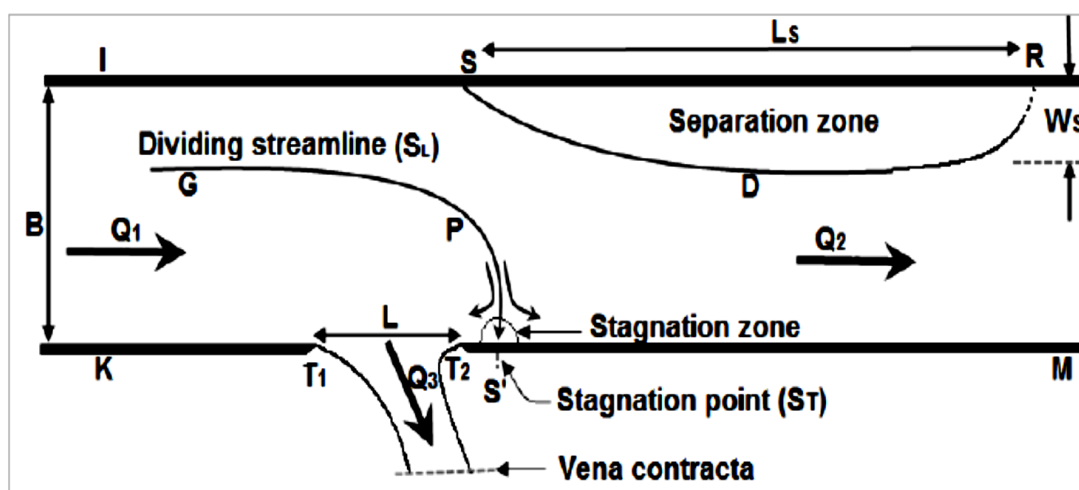
فصل پنجم به تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از مدل عددی می پردازیم.

فصل ششم شامل نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات می باشد.

^۱ - Volume Of Fluid



شکل ۱-۱: کانال روباز مستطیلی شامل سرریز جانبی [۳]



شکل ۲-۱: مشخصات جریان روی سرریز جانبی [۳]

فصل دوم

تئوری جریان های متغير مکانی

و

مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲ مقدمه

در این فصل پس از معرفی جریان متغیر مکانی، تئوری این جریان بیان می شود و معادلات حاکم بر این جریان مورد مطالعه قرار می گیرد و به نحوه به دست آوردن آن ها نیز اشاره می شود. از آنجا که در این پژوهش، به بررسی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی پرداخته می شود، لذا جریان متغیر مکانی با افزایش دبی به طور مختصر مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه انواع پروفیل های تشکیل شده روی سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفته و در انتها پژوهش های پیشین درباره سرریز های جانبی و جریان متغیر مکانی بیان می شود .

۲-۲ تئوری جریان متغیر مکانی

۱-۲-۲ تعریف

جریان متغیر مکانی^۱، جریانی است که در اثر افزایش یا کاهش دبی در طول مسیر به وجود می آید. به عبارت دیگر در این نوع جریان $\frac{\partial Q}{\partial x}$ مخالف صفر است (Q دبی و x بعد طولی جریان می باشد) و در طول مسیر جریان و در قسمتی از این طول یک جریان فرعی به جریان اصلی اضافه یا از آن کم خواهد شد. بدین ترتیب جریان متغیر مکانی به دو دسته جریان متغیر مکانی با افزایش دبی^۲ و جریان متغیر مکانی با کاهش دبی^۳ تقسیم می شود. از آنجا که به دلیل افزایش یا کاهش دبی در طول مسیر، مقدار انرژی جنبشی یا مقدار ممنتوم جریان (رابطه اندازه حرکت) تغییر پیدا خواهد کرد، رفتار هیدرولیکی جریان متغیر مکانی در هر کدام از دو حالت افزایش دبی و کاهش دبی یا یکدیگر تفاوت بسیار دارد.

۱- Spatially Varied Flow (SVF)

۲- SVF With Increasing Discharge

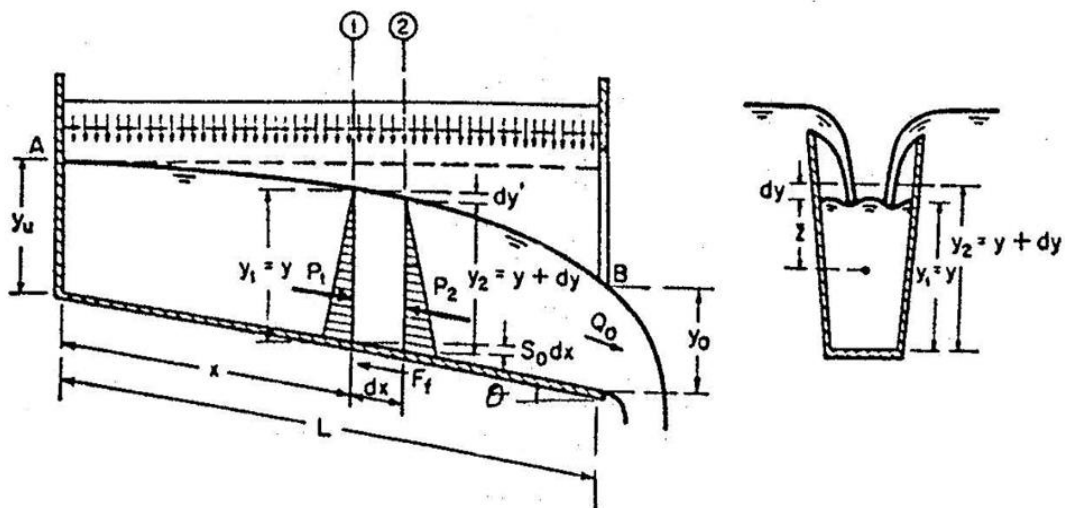
۳- SVF With Decreasing Discharge

۲-۱-۱-۱ جریان متغير مكاني با افزايش دبي

در اين نوع جريان كه در آن يك دبي فرعي به صورت جانيبي به جريان اصلي كانال اضافه مي شود به هنگام افزايش دبي به علت عمل تلاطم ناشي از اختلاط دو جريان، تفاوت دبي قابل ملاحظه اي به وجود مي آيد. با توجه به تغيير انرژي وپيچيده بودن مقدار آن، براي به دست آوردن روابط اين جريان از معادله اندازه حركت استفاده مي گردد. معادله پروفيل سطح آب در اين نوع جريان با توجه به فرضيات ساده كننده به شكل زير است [۴]:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - \frac{\beta Q}{gA^3 D} \frac{dQ}{dx}}{1 - \frac{\beta Q^2}{gA^3 D}} \quad (۲-۱)$$

كه در آن y عمق آب، S_o شيب كف كانال، S_f شيب خط انرژي، β ضريب تصحيح اندازه حركت، A سطح مقطع جريان، D عمق هيدروليكي و g شتاب ثقل مي باشد. جريان در كانال هاي جمع آوري آب هاي سطحي و كانال هاي سرريزهاي جانيبي سدها نمونه هايي از اين جريان مي باشند. با توجه به اينكه بحث در مورد جريان هاي متغير مكاني با افزايش دبي، موضوع پژوهش نمي باشد، براي توضيحات بيشتر در مورد اين نوع جريان به مرجع [۴] مراجعه شود. شكل (۲-۱) جريان در كانال سرريز را نشان مي دهد.



شکل ۱-۲: جریان متغیر مکانی با افزایش دبی در کانال سرریز جانبی سد [۴]

۲-۱-۲-۲ جریان متغیر مکانی با کاهش دبی

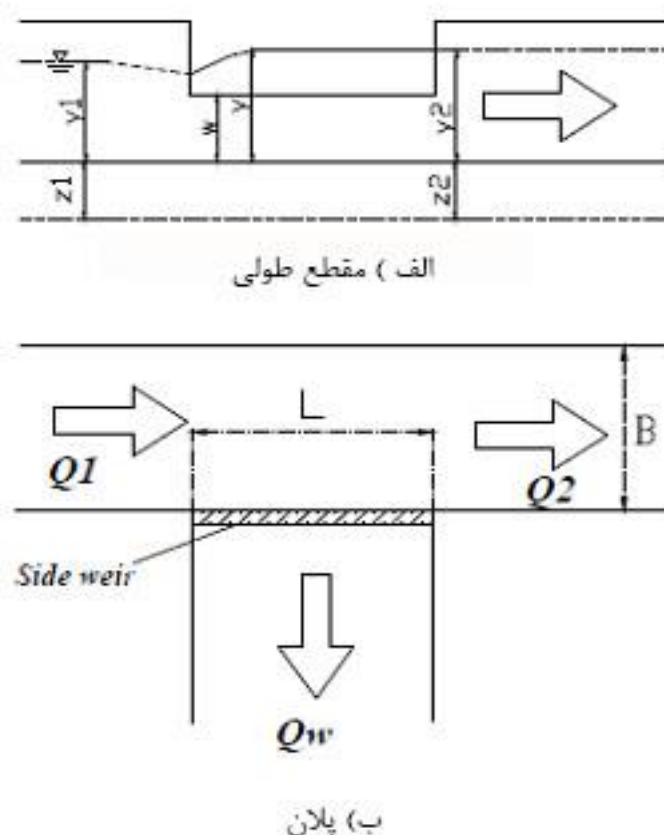
این نوع جریان اساساً یک جریان انشعابی است که تقسیم دبی در طول مسیر جریان انجام می گیرد. سرریز های جانبی، خروجی های کف^۱، روزنه های کف و کناری و دریچه های جانبی مثال هایی از این نوع جریان می باشد. مطالعات تئوری و آزمایشگاهی زیادی به منظور بررسی مشخصات جریان و تغییرات انرژی در طول جریان انشعابی انجام گرفته است. دیدگاه بیشتر پژوهشگران موافق با ثابت در نظر گرفتن مقدار انرژی در طول مسیر است.

ایشان معتقدند که شاخه ای شدن جریان باعث به وجود آمدن افت انرژی نمی شود یا اینکه مقدار آن در مقایسه با افت ناشی از اصطکاک قابل صرف نظر است. این نظریه با مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی برای جریان های زیر بحرانی به اثبات رسیده است. بدین ترتیب می توان با فرض ثابت بودن انرژی، روابط این نوع جریان را با استفاده از معادله انرژی به دست آورد.

۱- Bottom Rack

گروه دیگری از پژوهشگران بر این باورند که پدیده شاخه ای شدن جریان مستقل از اصطکاک و جریان های ثانویه عامل به وجود آمدن افت انرژی است و مقدار این افت بر خلاف نظر گروه اول قابل چشم پوشی نمی باشد.

بدین ترتیب برای به دست آوردن روابط حاکم بر این جریان، از معادله اندازه حرکت باید استفاده نمود و یا افت انرژی ناشی از شاخه ای شدن جریان را به کمک ترم های اضافی در معادله انرژی وارد نمود. تئوری جریان متغیر مکانی با کاهش دبی، برای اولین بار در طراحی سرریزهای جانبی در کانال ها به عنوان یکی از پر استفاده ترین موارد کاهش دبی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۲-۲) نمای ساده ای از سرریز جانبی و متغیرهای مربوط به آن، نشان داده شده است [۵].



شکل ۲-۲: شکل شماتیک سرریز جانبی؛ الف) مقطع طولی، ب) پلان [۵]

۲-۲-۲ روابط حاکم بر جریان در سرریز جانبی

با توجه به موضوع این پژوهش از بیان روابط جریان متغیر مکانی با افزایش دبی خودداری می شود. از آنجا که از روابط انرژی و اندازه حرکت هر دو می توان استفاده نمود، لذا هر دو روش در این قسمت بیان می شود.

۱-۲-۲-۲ روش معادله انرژی

در این روش از اصل انرژی استفاده می شود. با توجه به شکل (۲-۲) اگر V سرعت جریان باشد، انرژی کل در هر مقطع از کانال برابر است با :

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g} = z + y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^3} \quad (2-2)$$

با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز و با مشتق گیری نسبت به محور طولی (X) در جهت جریان رابطه زیر به دست می آید :

$$\frac{dH}{dX} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{2Q}{A^3} \frac{dQ}{dX} - \frac{2Q^2}{A^4} \frac{dA}{dX} \right) \quad (3-2)$$

از طرفی می توان نوشت :

$$\frac{dQ}{dx} = q_o, \frac{dz}{dx} = -S_o, \frac{dH}{dx} = -S_f \quad (4-2)$$

$$\frac{dA}{dx} = \left(\frac{dA}{dy} \right) \left(\frac{dy}{dx} \right) = T \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad (5-2)$$

که T عرض بالای جریان و q_o دبی در واحد طول سرریز می باشد. با جایگزینی روابط (۲-۴) و (۲-۵) در رابطه (۲-۳)، رابطه (۲-۶) که رابطه نهایی تغییرات پروفیل جریان است به دست می آید [۵]:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - \frac{\alpha Q}{gA^3} q_o}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^3 D}} \quad (۲-۶)$$

در رابطه بالا عبارت $\frac{\alpha Q^2}{gA^3 D}$ همان Fr^2 است (Fr عدد فرود است). این رابطه معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی می باشد که با استفاده از رابطه انرژی بدست آمده است .

۲-۲-۲-۲ روش معادله اندازه حرکت

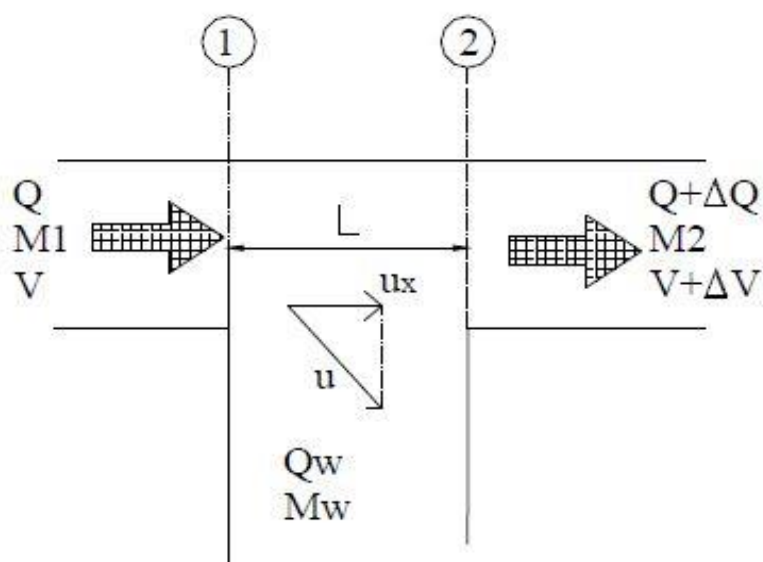
با توجه به شکل (۲-۳) چنانچه Q دبی در مقطع (۱) و $Q + \Delta Q$ دبی در مقطع (۲) باشد ΔQ نرخ تغییرات دبی) و همچنین V سرعت جریان در کانال اصلی و u_x مولفه طولی سرعت جریان انشعابی باشد، معادله اندازه حرکت به شکل زیر خواهد بود :

$$\rho \beta (Q + \Delta Q)(V + \Delta V) - \beta \frac{dQ}{dx} \Delta x u_x - \beta \rho Q v = P_1 - P_2 + w \sin \theta - F_f \quad (۲-۷)$$

که در آن P_1 و P_2 نیروهای ناشی از فشار هیدروستاتیک در مقاطع (۱) و (۲)، ρ جرم حجمی سیال، W وزن سیال در فاصله Δx ، θ زاویه کف کانال با افق، F_f نیروی ناشی از اصطکاک کف کانال در طول و β ضریب تصحیح اندازه حرکت می باشد. در به دست آوردن رابطه فوق فشار در دو مقطع، هیدروستاتیک و ضریب اندازه حرکت در طول سرریز ثابت فرض شده است.

با جایگزینی اجزا رابطه (۷-۲)، رابطه (۸-۲) که معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی با استفاده از معادله اندازه حرکت می باشد، به دست می آید [۵]:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - \frac{1}{gA} (\gamma \beta V - u_x) \frac{dQ}{dx}}{1 - \frac{\beta Q^2}{gA^3 D}} \quad (۸-۲)$$



شکل ۲-۳: مشخصات جریان در سرریز جانبی برای حل معادله اندازه حرکت [۵]

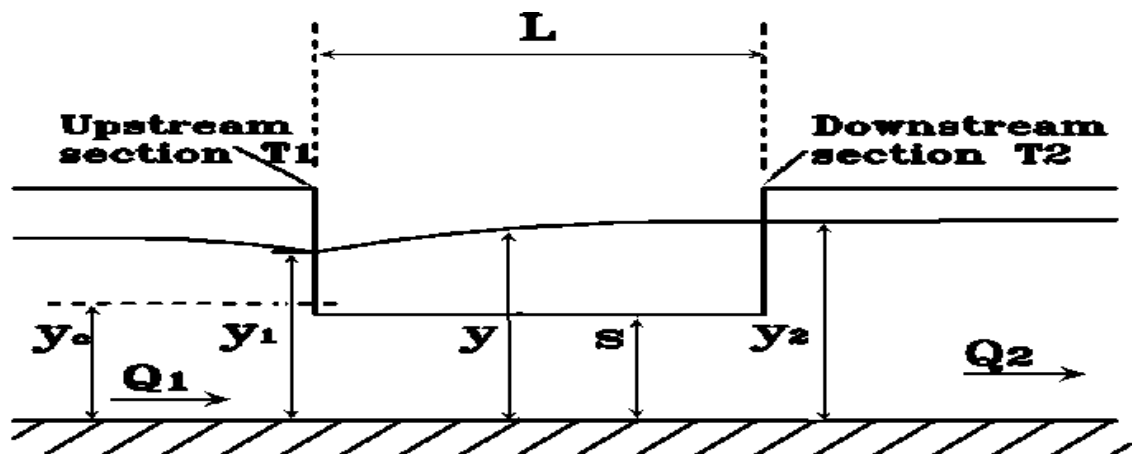
۳-۲-۲ پروفیل جریان روی سرریز جانبی

انواع پروفیل های جریانی که عموماً در سرریز های جانبی موازی کانال به وجود می آید، به شرح زیر می باشد [۶]:

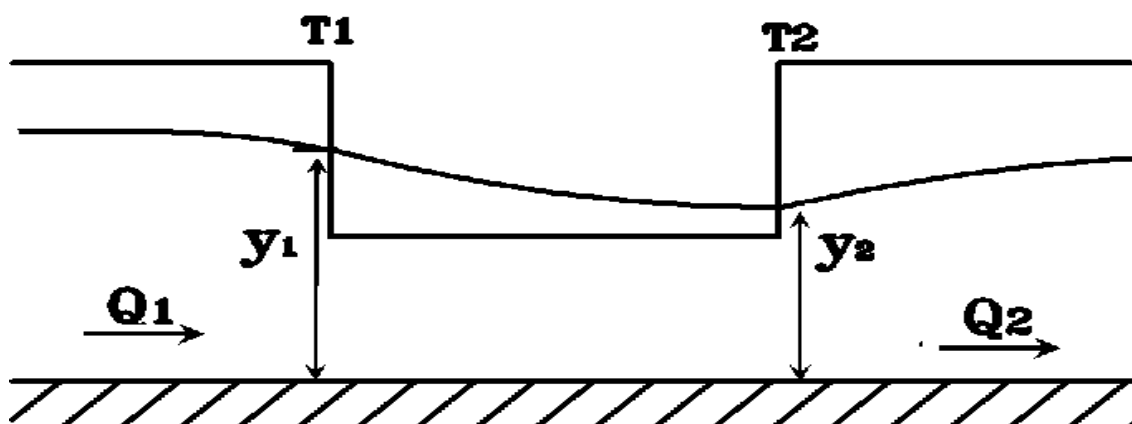
نوع ۱ (شکل ۴-۲ الف) : در این حالت جریان در تمام طول سرریز جانبی زیر بحرانی است ($Fr < 1$). سطح آب از بالا دست سرریز به سمت پایین دست آن به آرامی افزایش می یابد و این بدان معنی است که دبی در واحد عرض (q) در بالادست سرریز در مقایسه با پایین دست آن بیشتر است. این شرایط اساساً در کانال های با شیب ملایم رخ می دهد.

نوع ۲ (شکل ۴-۲ ب) : در این حالت جریان در تمام طول سرریز جانبی فوق بحرانی است ($Fr > 1$). سطح آب از بالا دست سرریز به سمت پایین دست آن پایین می افتد و این بدان معنی است که دبی در واحد عرض (q) در پایین دست سرریز در مقایسه با بالا دست آن کمتر است. این شرایط اساساً در کانا های با شیب تند رخ می دهد.

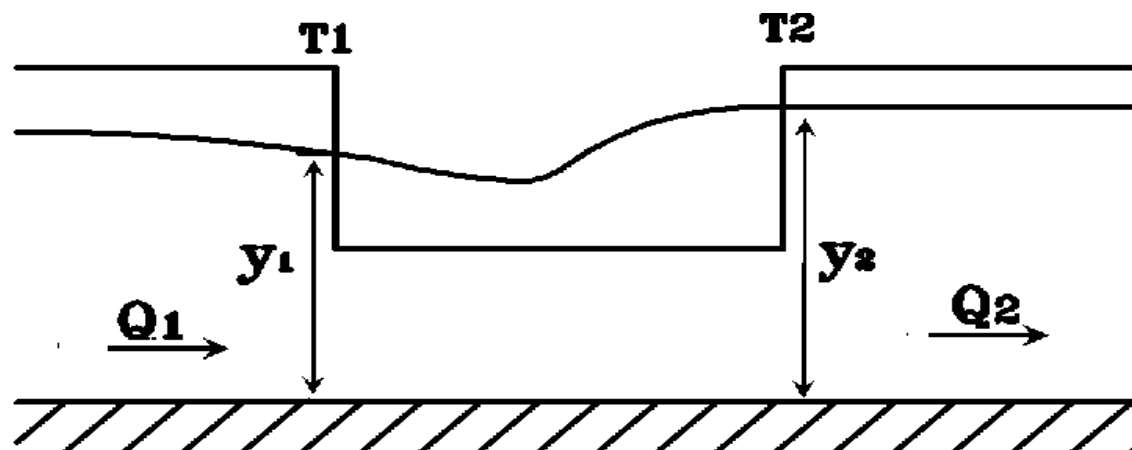
نوع ۳ (شکل ۴-۲ ج) : در این حالت جریان ترکیبی از دو حالت بالا می باشد. بدین صورت که جریان در ابتدا فوق بحرانی ($Fr > 1$) است و سطح آب در طول سرریز پایین می آید و در ادامه یک پرش صورت می گیرد و جریان در مقطع پایین دست سرریز زیر بحرانی ($Fr < 1$) می شود. پرش هیدرولیکی اتفاق افتاده در طول سرریز جانبی از لحاظ مشخصات با یک پرش معمولی در یک کانال روباز مستقیم کاملاً متفاوت می باشد.



شکل (۴-۲ الف) : پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی برای جریان زیر بحرانی



شکل (۴-۲ ب) : پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی برای جریان فوق بحرانی



شکل (۴-۲ ج) : پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی برای پرش هیدرولیکی

۳-۲ مروری بر مطالعات پیشین

۱-۳-۲ مطالعات تحلیلی

مطالعات دیمارچی در سال ۱۹۳۴ [۱]، پایه و اساس مطالعات بعدی بر روی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی در سرریز های جانبی قرار گرفت. وی برای به دست آوردن معادله ای جهت سرریز های جانبی و با توجه به شکل (۵-۲)، فرضیات زیر را در نظر گرفت :

۱- کانال مستطیلی و منشوری است.

۲- سرریز جانبی دارای طول کوتاه بوده و انرژی مخصوص بین مقاطع ابتدا و انتهای سرریز ثابت است. این امر معادل فرض $S_o - S_f = 0$ یا $S_o = 0$ و $S_f = 0$ بوده و نتایج تجربی نشان می دهد که این فرض منطقی می باشد.

۳- سرریز جانبی معادل یک سرریز لبه تیز بوده که هوادهی کامل صورت گرفته و آب به صورت آزاد خارج می شود.

۴- ضریب تصحیح انرژی مساوی یک می باشد.

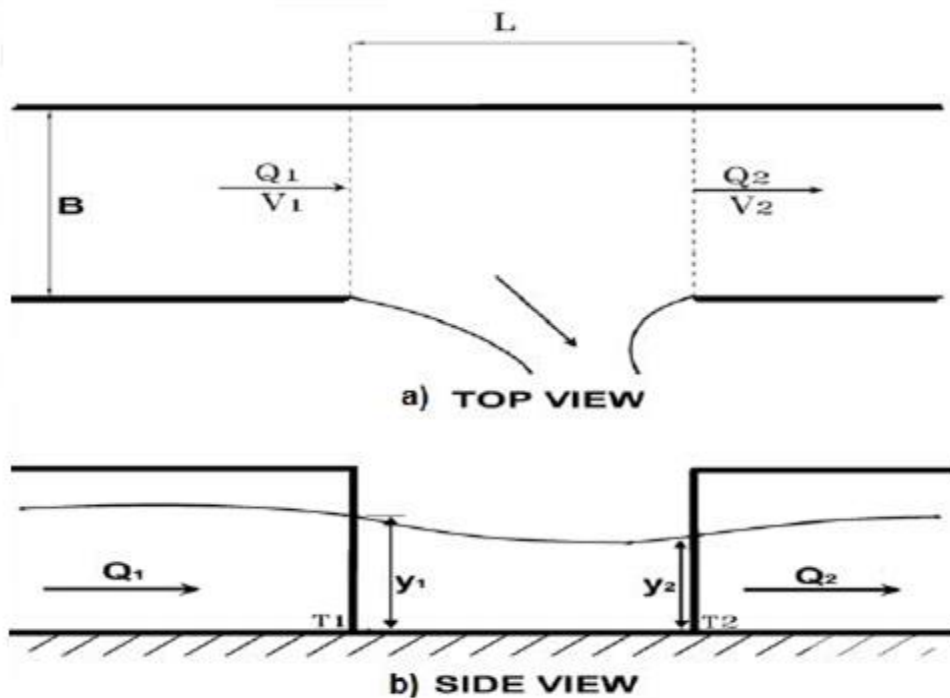
با توجه به فرضیات بالا معادله عمومی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی (۶-۲) را به صورت زیر نوشت :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy \left(-\frac{dQ}{dx} \right)}{gB^2 y^3 - Q^2} \quad (۹-۲)$$

از طرفی دبی روی سرریز و در واحد طول آن مساوی است با :

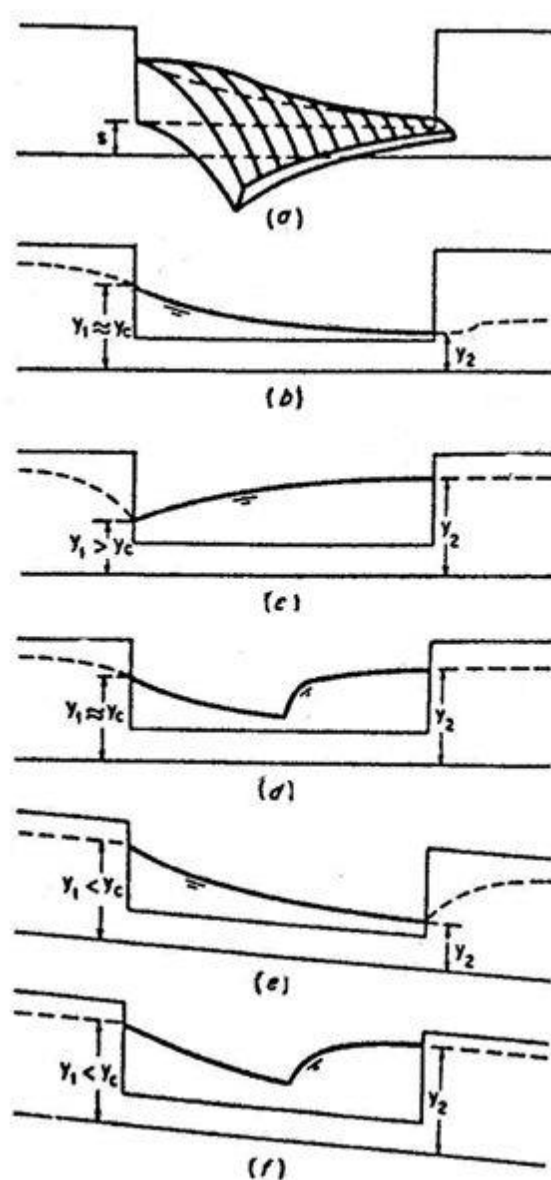
$$\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} C_m \sqrt{2g} (y - s)^{\frac{3}{2}} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن S ارتفاع آب پایه و C_m ضریب شدت جریان بوده و به ضریب دیمارچی موسوم است. C_m تابعی از پارامترهای هندسی و هیدرودینامیکی سرریز جانبی می باشد و برای تعریف آن پژوهش های زیادی انجام شده است. دیمارچی نشان داد که پروفیل جریان خطی نبوده و دارای انحنا می باشد و نیز با استفاده از علامت معادله (۹-۲) نشان داد که پروفیل جریان در حالت زیر بحرانی صعودی و در حالت فوق بحرانی نزولی خواهد بود.



شکل ۲-۵: جریان روی سرریز جانبی (ارتفاع آب پایه صفر) (a) نمای پلان (b) نمای کناری [۳]

مطالعات فریزر^۱ در سال ۱۹۵۷ [۷] نشان داد که پروفیل سطح آب در سرریزهای جانبی به ۵ حالت می تواند وجود داشته باشد که در شکل (۶-۲) نشان داده شده است، وی همچنین برای حالات فوق بحرانی و زیر بحرانی جریان، رابطه بین شدت جریان و عمق جریان و پارامترهای هندسی نظیر طول سرریز، عرض کانال و ارتفاع سرریز را ارائه داد.



شکل ۶-۲: پروفیل های مختلف جریان در طول سرریز جانبی در مطالعات فریزر [۷]

۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی

سابرامانیا^۱ و اواستی^۲ در سال (۱۹۷۲) [۸] آزمایشات خود را بر روی سرریز جانبی مستطیلی قرار گرفته شده در کانال روباز مستطیلی، با آب پایه صفر انجام دادند. تحقیقات انجام گرفته شده توسط ایشان نشان داد که ضریب شدت جریان C_m که به ضریب دیمارچی موسوم است تنها تابع Fr_1 بوده است. همچنین سابرامانیا در سال (۱۹۸۲) [۹] اظهار می دارد که ضریب C_m به هیچ کدام از عوامل y_1/L و L/B ، W/y_1 بستگی ندارد.

هاگر^۳ در سال (۱۹۸۷) [۱۰] آزمایشات خود را برای به دست آوردن ضریب شدت جریان برای سرریز جانبی با آب پایه صفر انجام داد. وی برای تعیین ضریب شدت جریان معادله مستقل برای هر پارامتر مثل عمق جریان بالا دست، سرعت ورودی، زاویه جریان خروجی جانبی، شیب کانال و شدت جریان خروجی جانبی ارائه داد. معادلات ارائه شده برای هر دو حالت جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفت.

برقی^۴ و همکاران در سال (۱۹۹۹) [۱۱] آزمایشاتی برای آنالیز پارامترهای موثر بر ضریب شدت جریان انجام دادند. ایشان یک پارامتر اضافی به عنوان شیب کانال (S_o) در محاسبات اعمال کردند. با مقایسه دبی اندازه گیری شده و دبی تئوری به دست آمده از مدل عددی مشخص شد که با اعمال شیب کف کانال در کنار دیگر پارامترهای موثر بر ضریب شدت جریان $(Fr, \frac{L}{B}, \frac{S}{y_1})$ نتایج بهتری حاصل می شود.

۱- Subramanya

۲- Awasthy

۳- Hager

۴- Borghei

منگرالکر^۱ در سال (۲۰۱۰) [۳] در دانشگاه کنکوردیا کانادا تحقیقات خود را بر روی سرریز جانبی مستطیلی قرار گرفته شده در کانال رو باز مستطیلی، با آب پایه صفر، به منظور بررسی پارامترهای مختلف جریان در سرریز جانبی انجام داد. وی نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی وی با نتایج مدل سابرامانیا و اواستی مورد تایید قرار گرفت.

۳-۳-۲ مطالعات عددی

رامامورتی^۲ و کاربالادا^۳ در سال (۱۹۸۰) [۱۲] برای آنالیز جریان روی سرریز جانبی مستطیلی پارامترهای $(F_r, \frac{L}{B}, \frac{S}{y_1})$ مورد بررسی قرار دادند و از مدل خطوط جریان آزاد مک ناون^۴ استفاده کردند. آن ها همچنین یک نوع دیگر از عدد فرود را ارائه دادند :

$$F_r = v_1 / \sqrt{g(y - s)} \quad (۲ - ۱۱)$$

موزلو^۵ در سال (۲۰۰۱) [۱۳] برای تعیین پروفیل سطح آب مدل عددی خود را بر اساس معادله انرژی ارائه داد. نتایج به دست آمده از مدل عددی وی با نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی سابرامانیا و اواستی مورد تایید قرار گرفته شد. وی همچنین مدل عددی خود را برای محدوده ای از نسبت های $(\frac{L}{B}, \frac{S}{y_1})$ تعمیم داد.

۱-Mangarulkar

۲- Ramamurthy

۳- Carballada

۴- McNown

۵-Muslu

۲-۳-۴ مطالعات مربوط به مدلسازی آشفتگی جریان

کی یو^۱ در سال (۲۰۰۵) [۱۴] برای شبیه سازی جریان روی سرریز جانبی از مدل آشفتگی سطح آزاد سه بعدی استفاده کرد. وی از مدل آشفتگی $k-\omega$ با استفاده از روش VOF برای تعیین پروفیل سطح آب روی سرریز جانبی با یک نسبت خاص از $\frac{L}{B}$ برابر با ۰/۴ استفاده کرد. نتایج عددی وی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سابرامانایا و اواستی مورد تایید قرار گرفت.

تدیون^۲ در سال (۲۰۰۹) [۱۵] برای تعیین میزان دبی، پروفیل سطح آب و توزیع سرعت از مدل آشفتگی (RSM^3) با استفاده از روش VOF استفاده کرد. وی نتایج عددی خود را برای میزان دبی و پروفیل سطح آب با استفاده از نتایج آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲) مورد تایید قرار داد. وی همچنین نتایج عددی خود را برای توزیع سرعت با نتایج آزمایشگاهی سابرامانایا و اواستی مورد تایید قرار داد.

۱-Qu

۲- Tadayon

۳- Reynolds Stress Model

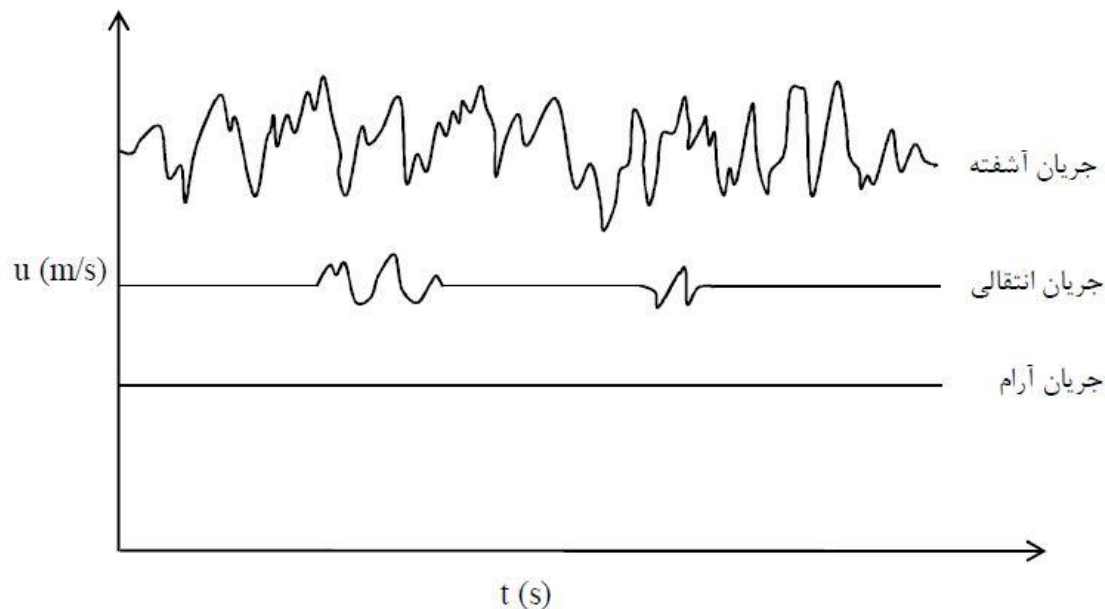
فصل سوم

مدلسازی جریان آشفته

۱-۳ مقدمه

جریان در کانال باز را می توان با توجه به پارامترهای مختلف به چند دسته طبقه بندی نمود. یکی از این طبقه بندی ها که برای هر هندسه ای اتفاق می افتد، جریان آرام، انتقالی و آشفته است. این طبقه بندی بر اساس تاثیر نیروی لزجت و اینرسی است. نسبت نیروهای اینرسی به لزجت عدد رینولدز را تشکیل می دهد. با داشتن مقیاس سرعت مشخصه (U) و مقیاس طول مشخصه (L) برای یک سیستم، عدد رینولدز از رابطه $Re = UL/v$ به دست می آید، که (v) لزجت سینماتیکی سیال می باشد. جریان آرام زمانی اتفاق می افتد که تاثیر نیروی لزجت بیشتر از نیروی اینرسی باشد. در جریان آرام ذرات سیال بر روی لایه های هموار یا ورقه های نازک حرکت می کنند. در جریان آرام $Re < 500$ می باشد. در جریان آشفته نیروی اینرسی تاثیر بیشتری نسبت به نیروی لزجت دارد. در جریان آشفته ذرات سیال به سرعت با هم مخلوط می شوند به طوری که در سه جهت با سرعت های نوسانی حرکت می کنند. در جریان آشفته $Re > 2000$ می باشد. جریان انتقالی یک حالت واسط می باشد که جریان از حالت آرام به آشفته و بالعکس تبدیل می شود. در جریان انتقالی $500 < Re < 2000$ می باشد. البته این مقادیر عدد رینولدز برای تقسیم بندی جریان آرام، انتقالی و آشفته کاملاً دقیق نبوده و باید اطلاعات دقیقی از هندسه کانال برای تعیین این مقادیر در دسترس باشد. در شکل (۱-۳) نمودار سرعت به مسیر حرکت در این نوع سه جریان رسم شده است.

در بسیاری از کانال های طبیعی و مصنوعی مقدار طول مشخصه زیاد بوده و عملاً در این نوع مجرا ها جریان آرام اتفاق نمی افتد. گردابه های جریان آشفته باعث نوسانی شدن سرعت حرکت سیال می شوند. برای مدل کردن این نوع جریان از رویکرد متوسط گیری رینولدز استفاده می شود. مفاهیم متوسط گیری توسط رینولدز در سال ۱۸۹۵ میلادی شروع شده است. در حالت کلی متوسط گیری رینولدز شکل های متنوع را فرض می کند که شامل انتگرال و مجموع یابی می باشد.



شکل ۳-۱: سرعت وابسته به زمان سیال در نقطه [۱۶]

سه شکل اغلب مناسب برای تحقیقات پیرامون مدل آشفته، متوسط زمانی^۱، متوسط مکانی^۲ و متوسط مجموع^۳ می باشند [۱۷].

متوسط زمانی برای آشفتگی ایستا^۴ مناسب می باشد، یعنی جریان آشفته ای که در حالت متوسط، با زمان تغییر نمی کند، مانند جریان در داخل یک لوله که با سرعت ثابت در حال حرکت می باشد. برای مثال پروفیل سرعتی که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، با استفاده از متوسط گیری برای اندازه گیری دقیق یک لایه مرزی مشابه به دست آمده است. کاربرد متوسط گیری رینولدز (هر سه نوع) به صورت ضمنی وابسته به یکنواختی مقادیر متوسط دارد.

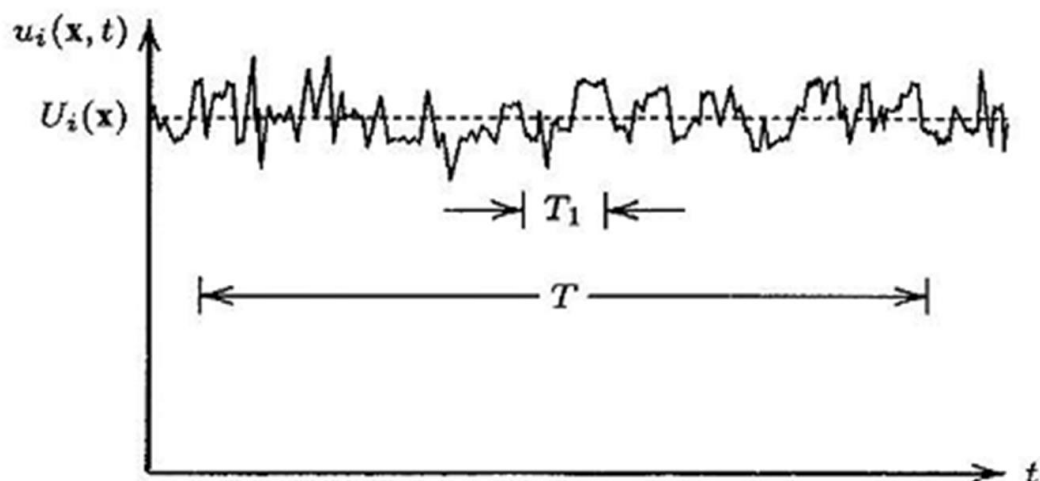
متوسط زمانی اغلب فرم معمول متوسط گیری رینولدز می باشد، چون اغلب جریان های آشفته پرکاربرد در مهندسی به صورت ایستا هستند. در این فصل برای به دست آوردن معادلات جریان آشفته از روش متوسط زمانی استفاده می شود.

۱- Time Average

۲- Spatial Average

۳- Ensemble Average

۴- Stationary Turbulence



شکل ۲-۳: متوسط زمانی برای آشفتگی ایستا [۱۷]

۲-۳ معادلات حاکم بر جریان آشفته

۱-۲-۳ معادله متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS)^۱

برای ساده سازی بیشتر، جریان سیال را با خواص ثابت و تراکم ناپذیر فرض می شود. معادلات ناویر استوکس برابر با :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱-۳)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} \quad (۲-۳)$$

^۱ - Reynolds Averaged Navier Stokes

که بردارهای u_i و x_i به ترتیب سرعت و موقعیت، t زمان، p فشار و ρ چگالی می باشند و t_{ij} تانسور تنش لزجت می باشد، که به صورت زیر تعریف می شود:

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

که μ لزجت مولکولی و s_{ij} تانسور نرخ کرنش:

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

توجه کنید که $s_{ij} = s_{ji}$ ، بنابراین $t_{ij} = t_{ji}$ برای سیال های لزج می باشد. در اینجا با توجه به معادله (3-1) (پیوستگی) تابع $\partial u_j / \partial x_j$ برابر صفر می باشد و با ساده سازی بیشتر، معادلات ناویر استوکس به شکل زیر باز نویسی می شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-5)$$

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

حال با استفاده از روش متوسط گیری زمانی معادلات بالا به صورت زیر تبدیل می شوند:

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

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

در اینجا گذشته از جایگزینی متغیرهای لحظه ای با متغیرهای متوسط، تنها فرق میان متوسط زمانی با معادلات مومنتوم ایستایی عبارت $\overline{u'_j u'_i}$ می باشد. این عبارت نرخ متوسط زمانی انتقال مومنتوم ناشی از آشفتگی می باشد. این عبارت، پایه و اساس مسائل آشفتگی را تشکیل می دهد. برای محاسبه تمامی خواص متوسط جریان آشفته، نیاز به دستورالعملی برای محاسبه $\overline{u'_j u'_i}$ می باشد.

معادلات (۷-۳) و (۸-۳) به عنوان معادلات متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS) شناخته می شوند. کمیت $-\overline{\rho u'_j u'_i}$ به عنوان تانسور تنش رینولدز^۱ تعریف می شود و در اینجا با علامت $\rho \tau_{ij}$ نشان می دهیم، بنابراین τ_{ij} تانسور تنش رینولدز مخصوص می باشد و برابر است با [۱۷]:

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_j u'_i} \quad (۹-۳)$$

در دیدگاه متوسط گیری رینولدز در مدل کردن آشفتگی نیاز است که تانسور تنش رینولدز به درستی مدل شود. روش معمول به کارگیری فرضیه بوزینسک^۲ با ارتباط دادن تانسور تنش رینولدز با گرادیان های سرعت متوسط می باشد [۱۸]:

$$\tau_{ij} = \nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (۱۰-۳)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (۱۱-۳)$$

۳-۲-۲ معادله انرژی آشفتگی

اگر سه تنش رینولدز نرمال را باهم جمع کنیم و در ۵/۰ ضرب کنیم، انرژی جنبشی آشفته تشکیل می شود که با علامت k نشان داده می شود. بنابراین:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (۱۲-۳)$$

این متغیر انرژی جنبشی نوسانات آشفتگی در واحد جرم می باشد. برای به دست آوردن معادله انرژی جنبشی از تریس (مجموع قطر اصلی ماتریس) تانسور تنش رینولدز استفاده می شود. یعنی:

$$\tau_{ii} = -\overline{u'_i u'_i} = -2k \quad (۱۳-۳)$$

۱- Reynolds Stress Tensor

۲- Boussinesq

شکل معادله دیفرانسیلی بر حسب تریس تنش رینولدز به صورت زیر می باشد :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} \right] \quad (3-14)$$

کمیت ε اتلاف در واحد جرم می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i \partial u'_j}{\partial x_k \partial x_k} \quad (3-15)$$

همچنین تقریب زیر، که از شبیه سازی عددی مستقیم به دست آمده، اعمال می شود:

$$\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} + \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} = - \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3-16)$$

در نهایت معادله به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3-17)$$

برای بستن این معادله عبارت τ_{ij} با تقریب بوزینسک (3-10) به دست می آید [18].

۳-۳ مدل های آشفتگی

۳-۳-۱ تعریف

هدف هر مدل توصیف رابطه بین کمیت های قابل اندازه گیری فیزیکی جریان و یا کمیت های محاسبه شده میدان جریان می باشد. به طور کلی مدل های آشفتگی برای معادلات RANS را می توان به چهار دسته کلی تقسیم نمود :

۱- مدل های صفر معادله ای (مدل های طول اختلاطی)

۲- مدل های تک معادله ای

۳- مدل های دو معادله ای

۴- مدل های انتقال تنش

واضح است که هیچ مدل آشفته‌گی وجود ندارد که برای تمامی مسائل مهندسی جوابگو باشد. انتخاب

مدل از بین مدل های موجود بستگی به :

- فیزیک جریانی که با آن در مساله مورد نظر درگیر هستیم
- وجود یا عدم وجود همزمان چند رژیم متفاوت جریانی در کنار یکدیگر
- میزان دقت مورد نیاز
- امکانات محاسباتی در دسترس
- میزان زمان مورد نیاز برای رسیدن به جوابی معقول

۳-۱-۳-۱ مدل های صفر معادله ای

ون درایست^۱ (۱۹۵۶) اصلاحیه تعدیل لزجت برای مدل طول اختلاط را اختراع کرد که در حقیقت شامل مدل های جبری مورد استفاده امروزی نیز می شود. سبسی^۲ و اسمیت^۳ (۱۹۷۴) مدل لزجت گردابه ای طول اختلاط را در یک نقطه دوباره تعریف کردند که می توان آن را با اطمینان زیادی برای اغلب لایه های مرزی استفاده کرد. برای از بین بردن مشکلات تعریف مقیاس طول آشفته‌گی برای

۱- Van Driest

۲- Cebeci

۳- Smith

لایه برشی نازک، بلد وین^۱ و لوماکس^۲ (۱۹۷۸) یک مدل جبری متناوب که برای سال های زیادی مورد استفاده قرار گرفت را پیشنهاد دادند.

به طور کلی نظریه طول اختلاطی، فقط برای جریانات نسبتاً ساده نظیر جریان های برشی نازک، جریان های جت و جریان های لایه مرزی تشکیل شده بر روی دیواره خوب کار می کند، چرا که تنها برای این جریان ها است که می توان طول آشفتگی (l_m) را با روابط تجربی ساده بیان نمود. اما این مدل اثرات انتقالی آشفته و نیز اثرات پیشین^۳ نظیر جریان های آشفته را در نظر نمی گیرد (به عنوان توضیح بیشتر، این مدل نمی تواند اثرات اغتشاشات ایجاد شده در بالا دست جریان را بر روی جریان پایین دست پیش بینی نماید). از نقطه نظر ریاضی، سیستم معادلات جریان به دست آمده از مدلسازی جریان آشفته از نوع جبری تقریباً همان سیستم معادلات مربوط به جریان های آرام می باشد که در آن μ ثابت و یا متغیر نسبت به مکان و رژیم موضعی جریان است، بنابراین از نقطه نظر محاسباتی و خواص همگرایی، می توان انتظار داشت که در استفاده از مدل صفر معادله ای در نهایت رفتاری شبیه به رفتار جریان های آرام را شاهد خواهیم بود.

به خصوص چنانچه از شرایط مرزی مناسب استفاده شده باشد، حل عددی با استفاده از این مدل ها، با سرعت بالاتری همگرا شده و نتایج همگرا شده بهتری را در تعداد تکرار کمتر خواهد داد. به علاوه در استفاده از روش صفر معادله ای (جبری، خواص همگرایی فرایند حل به پارامتر های زیر حساس نمی باشد.

▪ تغییرات جزئی در چگالی و توزیع مکانی المان ها

▪ تغییرات در شکل دامنه محاسباتی

▪ حدس اولیه آغازین

۴- Bladwin

۵- Lomax

۶- History Effects

لازم به ذکر است که به طور کلی این مدل برای جریانی که دارای رژیم های پیچیده در مقایسه با جریان های ساده کلاسیک می باشد و در نتیجه تعیین طول آشفتگی با مشکل مواجه می شود، مناسب نخواهد بود.

۳-۱-۲-۳ مدل تک معادله ای

از چهار نوع مدل آشفتگی نام برده شده در بالا، مدل تک معادله ای موفقیت و عمومیت کمتری دارد. شاید موفق ترین مدل اخیر از این نوع به وسیله برادشو^۱، فریس^۲ و اتول^۳ (۱۹۶۷) فرمول بندی شده است. علاقه مندی جدیدی در مدل های تک معادله ای بر مبنای معادله منطقی برای لزجت گردابی ایجاد شده است. این کار در ابتدا به واسطه سهولت حل عددی این معادلات نسبت به مدل های دو معادله ای و مدل های انتقال تنش مورد توجه قرار گرفت.

از مدل های تک معادله ای اخیر، مدل اسپالارت^۴ و آلمارس^۵ به نظر می رسد دقت بیشتری برای موارد کاربردی جریان آشفته مخصوص دارد. مدل مزبور برای کاربردهای هوا و فضا ارائه شده است و همچنین نتایج خوبی برای لایه های مرزی که در معرض گرادیان فشار معکوس قرار دارند، ارائه داده است. مدل های تک معادله ای به خاطر عدم توانایی در وفق دادن خود با تغییرات سریع در مقیاس های طولی همواره مورد انتقاد قرار داشته اند. این تغییرات شدید را به خصوص در تغییرات ناگهانی از جریان های محدود به دیواره به جریان های برشی آزاد مشاهده می نماییم.

۱- Bradshaw

۲- Ferriss

۳- Atwell

۴- Spalart

۵- Allmaras

۳-۱-۳-۳ مدل های دو معادله ای

در حالی که مدل $k-\omega$ کولموگرو^۱ اولین نوع از این مدل بود، تا ظهور رایانه مبهم باقی ماند. کار گسترده ای بر روی مدل های دو معادله ای توسط لاندنر^۲ و اسپالدینگ^۳ (۱۹۷۲) صورت گرفت و مو فیتی ادامه دار توسط دانشجویها و همکارانش به دست آمد. مدل $k-\epsilon$ لاندنر به عنوان مدل طول اختلاط شناخته می شد و تا دهه ی آخر قرن بیستم، به طور گسترده ای به عنوان مدل دو معادله ای مورد استفاده قرار می گرفت. نارسایی قابل اثبات این مدل، برای جریان های با گرادیان فشار معکوس، در ابتدا پهنه ی استفاده از آن را کمی کم رنگ کرده بود.

بدون شناخت قبلی از کار کولموگرو، سافمن^۴ (۱۹۷۰) مدل $k-\omega$ را شبیه سازی کرد که فواید مدل $k-\epsilon$ ، خصوصاً برای انتگرال گیری از طریق زیر لایه لزج و برای پیش بینی اثرات گرادیان فشار معکوس، بهرمنند شد. برای مثال ویلکاکس^۵ و آلبر^۶ (۱۹۷۲)، سافمن و ویلکاکس (۱۹۷۴)، ویلکاکس و تریسی^۷ (۱۹۷۶)، ویلکاکس (۱۹۸۸ و ۱۹۹۸)، منتر^۸ (۱۹۹۲) و هلستن^۹ (۲۰۰۵)، مدل های $k-\omega$ کاربردی و پیشرفته تری را پیگیری کردند.

به طور کلی مدل های دو معادله ای به عنوان زیر بنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدلسازی جریان های آشفته، به خصوص در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. ساده ترین مدل های کامل آشفتگی (که در عین قابلیت های بالا، دارای معادلات نسبتاً ساده ای نیز می باشند) مدل های

۱- Kolmogorov

۲- Launder

۳- Spalding

۴- Saffman

۵- Wilcox

۶- Alber

۷- Traci

۸- Menter

۹- Hellsten

دو معادله ای هستند که در آن ها، حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین شدن مستقلانه مقیاس سرعت آشفته‌گی و مقیاس طول آشفته‌گی می شوند.

مهمترین اختلاف بین مدل های دو معادله ای و سایر مدل های آشفته‌گی آن است که مدل دو معادله ای مدل های کاملی می باشند یعنی از آن ها می توان برای پیش بینی خواص یک جریان آشفته بدون آگاهی قبلی از ساختار جریان و یا هندسه جریان استفاده نمود. نقطه آغاز تمام مدل های آشفته‌گی دو معادله ای استفاده از تقریب بوزینسک و معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفته‌گی k می باشد. انتخاب متغیر دوم دلخواه بوده که تا امروز پیشنهادات بسیاری برای این انتخاب ارائه شده است.

توانمندی، اقتصادی بودن و دقت قابل قبول برای طیف وسیعی از جریان های آشفته، این مدل را به یک مدل رایج برای جریان های صنعتی و مدلسازی انتقال حرارت نموده است.

۳-۳-۱-۴ مدل های انتقال تنش

از سال ۱۹۷۰ منابع رایانه ای کافی در دسترس باعث پیشرفت های جدی در این مدل شد. اما به خاطر تعداد زیاد معادلات و پیچیدگی های موجود در مدل های انتقال تنش، راهی برای برطرف کردن میزان کاربرد نسبتاً کم در مقایسه با مدل های جبری و دو معادله ای پیدا نشد.

در این پژوهش به شبیه سازی عددی با استفاده از مدل های آشفته‌گی دو معادله ای پرداخته شده و در ادامه به بیان مدل های آشفته‌گی استفاده شده در این پژوهش می پردازیم.

۳-۳-۲ مدل k - ε

ساده ترین مدل های کامل آشفته، مدل های دو معادله می باشند که دو معادله انتقال جداگانه را حل می کنند، تا سرعت آشفتهگی و مقیاس طولی به صورت مستقل به دست آیند. مدل دو معادله ای که در دهه ی آخر قرن بیستم بسیار عمومی شده بود، مدل k - ε بوده است. اولین تلاش ها برای توسعه این مدل توسط چو^۱ (۱۹۴۵)، داویدو^۲ (۱۹۶۱) و هارلو^۳ و ناکایاما^۴ (۱۹۶۸) انجام پذیرفته است. گسترش استفاده از این مدل به وسیله نسخه ارائه شده توسط جونز^۵ ولاندر (۱۹۷۲) می باشد. لاندر و شارما^۶ (۱۹۷۴) متعاقباً ضرایب مدل بسته را دوباره تنظیم کردند و مدلی به وجود آورده اند که معمولاً به عنوان مدل k - ε استاندارد به آن اشاره می شود [۱۷]. در اینجا دو نوع استاندارد^۷، RNG^۸ را از مدل k - ε بررسی خواهیم کرد.

هر دو مدل شکل های مشابهی در معادلات انتقالی برای k و ε دارند. فرق اساسی در مدل ها در روش محاسبه لزجت آشفتهگی و ترم های تولید و اتلاف در معادله ε می باشد [۱۸].

۳-۳-۱ مدل k - ε استاندارد

مدل استاندارد زیر به وسیله لاندر و اسپالینگ تهیه شده است. توانمندی، اقتصادی بودن و دقت معقولانه این مدل برای پهنه وسیعی از جریان های آشفته، این مدل را برای شبیه سازی جریان های صنعتی و انتقال گرما محبوب کرده است. مدل k - ε استاندارد مدلی نیمه تجربی بر مبنای مدل کردن معادلات انتقالی برای انرژی جنبشی (k) و نرخ اتلاف آن (ε) می باشد.

۱- Chou

۲- Davidov

۳- Harlow

۴- Nakayama

۵- Jones

۶- Sharma

۷- Standard

۸- Renormalization Group

معادله انتقال مدل برای انرژی جنبشی از معادله دقیق حاصل می شود (به قسمت ۳-۲-۲ مراجعه کنید)، در حالی که معادله انتقال مدل برای ε با استفاده از استدلال های فیزیکی و در نظر گرفتن شباهت اندک آن با همتای دقیقش (به دست آمده از همتای ریاضی)، به دست می آید [۱۸].

معادلات این مدل به صورت زیر می باشد.

لزجت گردابه ای:

$$v_T = \frac{C_\mu k^\gamma}{\varepsilon} \quad (3-18)$$

انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3-19)$$

نرخ اتلاف آشفتگی:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^\gamma}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3-20)$$

ضرایب ارتباط دهنده:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (3-21)$$

این معادلات فقط بر جریان آزاد برشی اعمال می شود. برای جریان های لایه مرزی نزدیک دیوار، برای به حساب آوردن وجود دیوار معادلات نیازمند تغییرات می باشند [۱۷].

۲-۲-۳-۳ مدل RNG k-ε

این مدل از یک تکنیک آماری سخت به دست می آید. شکل این مدل شبیه به مدل استاندارد می باشد، اما در موارد زیر با هم تفاوت دارند :

- مدل RNG یک ترم اضافی در معادله ε دارد که باعث افزایش دقت می شود.
 - ثابت های مدل RNG با مدل استاندارد متفاوت می باشد.
 - تأثیر گردابه متحرک در آشفستگی در مدل RNG در نظر گرفته می شود، برای جریان های چرخشی به دقت کار کمک می کند.
 - در حالی که مدل استاندارد برای عدد رینولدز بالا مناسب می باشد، مدل RNG برای اثرات لزجت در عدد رینولدز پایین هم مناسب می باشد [۱۸].
- معادلات این مدل به صورت زیر می باشند [۱۷].

لزجت گردابه ای سینما تیکی:

$$v_T = \frac{C_\mu k^\gamma}{\varepsilon} \quad (۲۲ - ۳)$$

انرژی جنبشی آشفستگی:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (۲۳ - ۳)$$

نرخ اتلاف آشفستگی:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^\gamma}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - R_\varepsilon \quad (۲۴ - ۳)$$

ضرایب ارتباط دهنده:

$$R_{\varepsilon} = \frac{C_{\mu} \eta^{\gamma} \left(1 - \frac{\eta}{\eta_o}\right) \varepsilon^{\gamma}}{1 + \beta \eta^{\gamma}} \frac{1}{k}, \equiv \frac{Sk}{\varepsilon}, \eta_o = 4.38, \beta = 0.012, C_{\varepsilon_2} = 1.68 \quad (25-3)$$

$$C_{\varepsilon_1} = 1.42, \quad C_{\mu} = 0.0845, \quad \sigma_k = \sigma_{\varepsilon} = 0.72 \quad (26-3)$$

۳-۳-۳ مدل $k-\omega$ استاندارد

کولموگورو (۱۹۴۲) اولین مدل دو معادله ای آشفتگی را پیشنهاد کرده بود. کولموگورو انرژی جنبشی آشفتگی را به عنوان یک پارامتر آشفتگی انتخاب کرد و مانند پرانتل (۱۹۴۵)، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار آن را شبیه سازی کرد. پارامتر دوم، اتلاف در واحد انرژی جنبشی (ω) بود. در مدل $k-\omega$ ، ω به عنوان یک معادله دیفرانسیلی شبیه به معادله k رفتار می کند. سافمن (۱۹۷۰) بدون توجه به کارهای کولموگورو یک مدل $k-\omega$ را فرمول بندی نمود که استدلال بهتری نسبت به مدل کولموگورو داشت. روش زیر برای مدل $k-\omega$ ، به طور چشمگیری دقت پیش بینی مدل ویلکاکس (۱۹۸۸) برای جریان های برشی و جریان های جدا شده قوی را بهبود بخشیده است. مدل ویلکاکس اصلاحاتی برای اثرات عدد رینولدز پایین، تراکم پذیری و انتشار جریان برشی انجام داد. این مدل تجربی بر مبنای معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف مخصوص (ω) می باشد.

لزجت گردابه ای:

$$v_T = \frac{k}{\tilde{\omega}}, \quad \tilde{\omega} = \max \left\{ \omega, C_{lim} \sqrt{\frac{2S_{ij}S_{ij}}{\beta^*}} \right\}, \quad C_{lim} = \frac{\gamma}{\lambda} \quad (27-3)$$

انرژی جنبشی آشفتهگی:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (28-3)$$

نرخ اتلاف آشفتهگی:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (29-3)$$

ضرایب ارتباط دهنده:

$$\alpha = 1, \beta = \beta_o f_\beta, \beta^* = \beta_o^*, f_{\beta^*}, \sigma_k = \frac{1}{\gamma}, \sigma_\omega = \frac{1}{\gamma}, \beta_o^* = 0.09 \quad (30-3)$$

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 6\lambda \cdot \chi_k^\gamma}{1 + 6 \cdot \chi_k^\gamma} & \chi_k > 0 \end{cases}, \quad \chi_k = \frac{1}{\omega^\gamma} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (31-3)$$

$$\beta_o = 0.072, f_\beta = \frac{1 + \gamma \cdot \chi_\omega}{1 + \lambda \cdot \chi_\omega}, \chi_\omega \equiv \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_o^* \omega)^\gamma} \right|, \quad \omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (32-3)$$

تانسورهای Ω_{ij} و S_{ij} در متغیر χ_ω ، تانسورهای چرخش متوسط و نرخ کرنش متوسط هستند که برابرند با:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), S_{ij} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (33-3)$$

کمیت χ_ω را برای ساده سازی می توان در جریان های دو بعدی صفر در نظر گرفت. وابستگی β به χ_ω ، از کار های پاپ^۱ (۱۹۷۸) الگو گرفته شد که تأثیر موثری بر روی جت های مدور و شعاعی دارد [۱۷].

۳-۴ قانون دیوار

قانون دیوار یکی از مشهورترین روابط محاسبه شده از روی آزمایش در جریان های آشفته نزدیک مرزهای صلب می باشد. اندازه گیری ها نشان می دهند که برای هر دو جریان درونی و بیرونی، سرعت جریان در نزدیکی دیوار به صورت لگاریتمی با فاصله از سطح تغییر می کند. این رفتار به عنوان قانون دیوار شناخته می شود.

مشاهدات لایه مرزی آشفته در عدد رینولدز بالا، تعریف تقریبی کاربردی از استاتیک آشفتگی در نزدیکی سطح را آشکار می سازد. اثرات اینرسی سیال و افت فشار در نزدیک سطح اندک می باشد. در نتیجه استاتیک جریان نزدیک سطح در لایه مرزی آشفته با دو مکانیسم اولیه ساخته می شود. اول سرعت در جایی که مومنتوم به سطح انتقال می یابد، در سطح واحد در زمان واحد، که معادل با تنش برشی محلی τ ، می باشد. دوم نفوذ مولکولی مومنتوم که نقش مهمی در نزدیکی سطح بازی می کند. مشاهدات همچنین نشان می دهد که جزئیات گردابه های دور از سطح اهمیت کمی در استاتیک جریان نزدیک دیوار دارند.

اعتبار این تقریب توصیف شده با کاهش y/δ افزایش می یابد، که δ ضخامت لایه مرزی می باشد. این موضوع درست می باشد زیرا نسبت اندازه گردابه دور از سطح به اندازه گردابه نزدیک سطح با کاهش y/δ افزایش می یابد.

اگر چه τ در نزدیکی سطح تغییر می کند، اما تغییرات با فاصله از سطح (y) به طور واضح کم می شود. از این رو برای آنالیز ابعادی زیر، از تنش برشی سطح τ_w ، به جای تنش برشی محلی استفاده شده است. همچنین لزجت سیال را با نماد μ نشان می دهیم. چون رفتار آشفتگی در گاز و مایع یکسان می باشد، عاقلانه است که با τ_w/ρ و لزجت سینماتیکی $\nu = \mu/\rho$ به عنوان کمیت های ابعادی اولیه شروع کنیم، و در نتیجه چگالی سیال از کمیت ابعادی اولیه حذف می شود.

چون بعد کمیت τ_w/ρ زمان^۲/طول می باشد، در حالی که v زمان^۲/طول می باشد، می توان یک مقیاس سرعت (u_τ) را با تعریف زیر به دست آورد :

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3-34)$$

و v/u_τ را به عنوان مقیاس طول در نظر گرفت. کمیت u_τ به عنوان سرعت جزئی شناخته می شود، و مقیاس سرعتی است که سرعت های نزدیک مرز صلب را نشان می دهد. اگر گرادیان سرعت متوسط به صورت $\partial U/\partial y$ فرض شود، با استفاده از آنالیز ابعادی می توان توابع u_τ ، v/u_τ ، v و y را به صورت زیر به هم مرتبط ساخت.

$$\partial U/\partial y = \frac{u_\tau}{y} F(u_\tau y/v) \quad (3-35)$$

که به صورت یک تابع کلی فرض شده است. بررسی داده های آزمایشگاهی برای محدوده ی وسیعی از لایه های مرزی به عنوان یک تقریب خوب نشان می دهد که :

$$u_\tau y/v \rightarrow \infty \Rightarrow F(u_\tau y/v) \rightarrow \frac{1}{k} \quad (3-36)$$

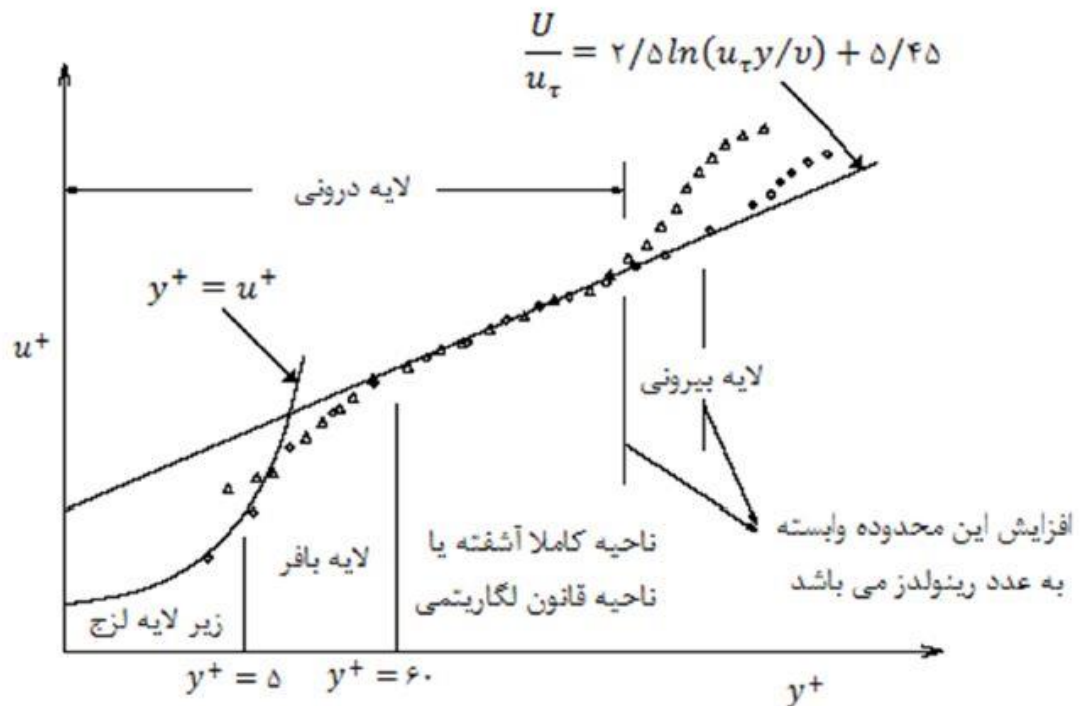
که K ثابت کارمن می باشد. با انتگرال گیری نسبت به y ، قانون مشهور دیوار به دست می آید :

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln(u_\tau y/v) + C \quad (3-37)$$

که C ثابت انتگرال گیری بی بعد می باشد. اندازه گیری های مرتبط نشان می دهد که $C \approx 5$ برای سطوح صاف و $K \approx 0.41$ برای سطوح صاف و زیر می باشد [۱۷].

آزمایش های متعدد نشان داده است که منطقه نزدیک دیوار را می توان اساساً به سه لایه تقسیم کرد. در لایه درونی، به نام زیر لایه لزج، جریان تقریباً آرام است، و لزجت (مولکولی) نقش غالب در حرکت و حرارت و انتقال جرم دارد. لایه میانی، به نام لایه بافر می باشد که اثرات لزجت مولکولی و آشفتگی اهمیت یکسانی دارند و در لایه بیرونی جریان کاملاً آشفته می باشد. شکل (۳-۳) این

قسمت ها را در منطقه نزدیک به دیوار نشان می دهد، که در محور مختصات نیمه لگاریتمی رسم شده است [۱۸].



شکل ۳-۳: تقسیم بندی منطقه نزدیک دیوار [۱۸]

گراف موجود در شکل سرعت بی بعد را به صورت u^+ و فاصله بی بعد را به صورت y^+ نشان می دهد و به صورت زیر تعریف می شوند:

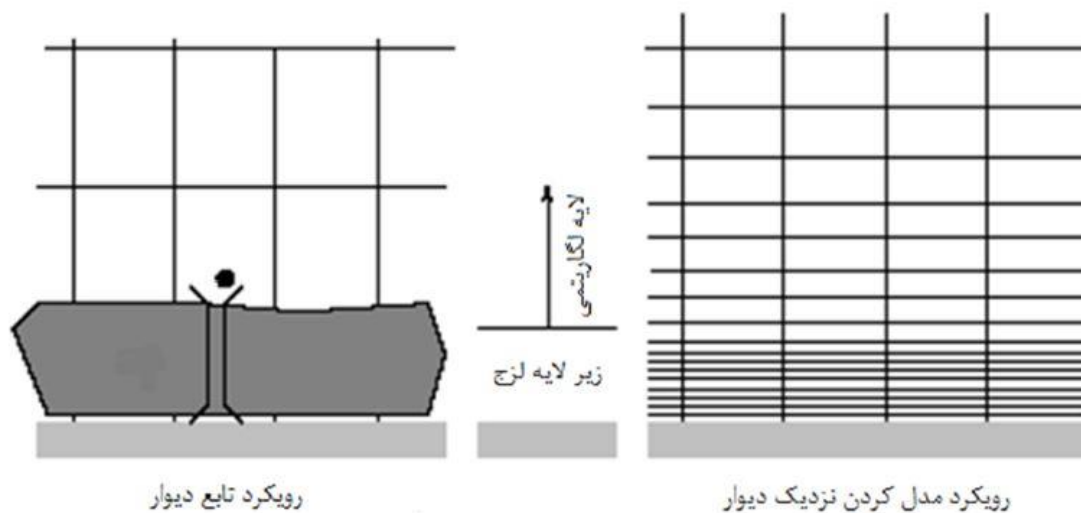
$$u^+ \equiv \frac{U}{u_\tau} \quad \text{و} \quad y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (3-38)$$

پروفیل سرعت با قانون دیوار برای مقادیر y^+ بزرگتر از ۳۰ مطابقت می کند. با افزایش عدد رینولدز، ماکزیمم مقدار y^+ که در آن پروفیل سرعت واقعی با مقدار قانون دیوار مطابقت می کند، افزایش می یابد.

۳-۵ مدل کردن نواحی نزدیک دیوار

به طور کلی دو رویکرد برای مدل کردن نواحی نزدیک دیوار وجود دارند. در رویکرد اول، تأثیرات لزجت در ناحیه زیر لایه لزج در نظر گرفته نمی شود. در عوض، فرمول نیمه تجربی قانون دیوار برای ارتباط اثرات زیر لایه لزج بین دیوار و لایه لگاریتمی استفاده می شود. استفاده از قانون دیوار، نیاز به اصلاح مدل های آشفتگی برای به حساب آوردن حضور دیوار را مرتفع می سازد.

در رویکرد دوم، مدل های آشفتگی با در نظر گرفتن ناحیه لزج در فرایند حل اصلاح می شوند، که اینکار را با مش هایی در مسیر دیوار با در نظر گرفتن زیر لایه لزج صورت می گیرد. این رویکرد را مدل کردن در نزدیک دیوار می نامند. این دو رویکرد در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ : رفتار نزدیک دیوار [۱۸]

رویکرد تابع دیوار عمومیت بیشتری دارد، زیرا اقتصادی، نیرومند و دقت معقولانه ای دارد [۱۸].

۳-۶ تابع استاندارد دیوار

تابع استاندارد دیوار بر مبنای کار لاندرو اسپالینگ می باشد، و اغلب به طور وسیعی در جریان های صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد.

قانون دیوار برای معادله مومنتوم به صورت زیر می باشد.

$$U^* = \frac{1}{k} \ln(Ey^*) \quad (3-39)$$

که:

$$U^* \equiv \frac{U_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (3-40)$$

سرعت بی بعد می باشد و :

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (3-41)$$

فاصله بی بعد از دیوار می باشد. $\kappa \approx 0.4187$ ثابت ون کارمن، $E = 9.793$ ثابت آزمایشگاهی، U_p سرعت متوسط جریان در نقطه نزدیک دیوار، k_p انرژی جنبشی آشفتگی در نقطه p نزدیک دیوار، y_p فاصله نقطه p نسبت به دیوار، τ_w تنش برشی دیوار و μ لزجت دینامیکی جریان می باشد. قانون لگاریتمی برای سرعت متوسط برای $30 < y^* < 300$ معتبر می باشد. در اینجا قانون لگاریتمی برای $y^* > 11/225$ اعمال می شود.

هنگامی که $y^* > 11.225$ سلول های نزدیک دیوار وجود داشته باشد، در رابطه تنش کرنش لایه ای اعمال می شود، یعنی:

$$U^* = y^* \quad (3-42)$$

توجه شود که y^* و y^+ در لایه های مرزی آشفته ساکن تقریباً برابر می باشند [۱۸].

شرایط مرزی تحمیل شده برای k در دیوار به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (3-43)$$

که n مختصات محلی عمود بر دیوار می باشد.

ترم تولید k بر مبنای قانون لگاریتمی برابر است با:

$$\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho k_p^+ y_p} \quad (3-44)$$

و $\mathcal{E}$ از طریق زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^+ k_p^+}{\kappa y_p} \quad (3-45)$$

در نواحی نزدیک دیوار معادله $\mathcal{E}$ حل نمی شود و از معادله (3-15) استفاده می شود.

۷-۳ روش VOF

روش VOF می تواند دو یا چند سیال مخلوط نشدنی را با حل دستگاه منفرد معادلات حرکت و ردیابی کسر حجمی هر یک از سیالات درون دامنه حل، مدل کند. نمونه های کاربردی آن شامل پیش بینی فرو پاشی جت، حرکت حباب های بزرگ در یک سیال، حرکت سیال پس از شکست سد، و ردیابی پایدار و ناپایدار هر سطح مشترک مایع و گاز می باشد.

فرمول VOF متکی بر این واقعیت است که دو یا چند سیال (یا فاز) در یکدیگر نفوذ نمی کنند. برای هر فاز اضافی که به مدل اضافه شده، یک متغیر به صورت کسر حجمی فاز در سلول های محاسباتی معرفی می شود. در هر حجم کنترل، مجموع کسر حجمی فازها برابر واحد است. نواحی برای تمامی متغیر ها و خصوصیات به وسیله فازها و نشان دادن مقادیر حجم متوسط تقسیم بندی می شوند، تا زمانی که کسر حجمی هر یک از فازها در هر مکان شناخته شود. بنابراین متغیر ها و خصوصیات در هر سلول داده شده یا کاملاً بیانگر یکی از فازها است، و یا بیانگر ترکیبی از فازها، بسته به مقدار کسر حجمی می باشد. به عبارت دیگر، اگر کسر حجمی سیال q^{th} در سلول به صورت α_q مشخص شود، بنابراین شرایط زیر امکان پذیر می باشند:

$$\alpha_q = 0 \quad \text{سلول خالی است (از سیال } q^{th} \text{)}$$

$$\alpha_q = 1 \quad \text{سلول پر است (از سیال } q^{th} \text{)}$$

$$0 < \alpha_q < 1 \quad \text{سلول شامل سطح مشترکی از سیال } q^{th} \text{ و یک یا چند سیال دیگر می باشد.}$$

بر اساس مقادیر محلی α_q ، خصوصیات و متغیر های مناسب به هر حجم کنترل درون دامنه حل اختصاص داده می شود.

ردیابی سطح مشترک بین فازها به وسیله حل معادله پیوستگی برای کسرحجمی یک (یا چند) فاز انجام می شود. برای فاز q^{th} ، این معادله به صورت زیر است :

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3-46)$$

که در آن $\dot{m}_{qp}$ انتقال جرم از فاز q به فاز p و $\dot{m}_{pq}$ انتقال جرم از فاز p به فاز q است. به طور پیش فرض، عبارت منبع در سمت راست معادله ، $S_{\alpha q}$ ، صفر است، اما می توان یک منبع جرم ثابت یا تعریف شده هر برای فاز تعیین کرد.

معادله کسر حجمی برای فاز اولیه حل نخواهد شد، کسر حجمی فاز اولیه بر اساس محدودیت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3-47)$$

معادله کسر حجمی ممکن است از طریق گسسته سازی زمان بر اساس طرح ضمینی و یا صریح حل شود.

طرح ضمینی:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (3-48)$$

طرح صریح:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha q} \right] V \quad (3-49)$$

که در آن $n+1$ شاخص گام زمانی جدید(فعلی)، n شاخص گام زمانی قبلی، $\alpha_{q,f}^n$ مقدار سطحی کسر حجمی، V حجم سلول و U_f حجم شار عبوری از سطح بر اساس سرعت نرمال، می باشند.

خواص ظاهر شده در معادلات انتقال با حضور مولفه فازها در هر حجم کنترل تعیین می شود. به عنوان مثال، در یک سیستم دو فازی، اگر فازها با اندیس ۱ و ۲ نشان داده شوند، و در صورتیکه کسری حجمی هر فاز دوم مشخص شود، چگالی در هر سلول توسط فرمول زیر به دست می آید :

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3 - 50)$$

به طور کلی، برای یک سیستم فازی، چگالی متوسط کسری حجمی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (3 - 51)$$

بقیه خصوصیات (مانند لزجت) نیز با همین روش به دست می آیند.

معادله حرکت منفرد در سراسر دامنه حل شده، و در نتیجه میدان سرعت میان فازها تقسیم بندی می شود. معادله حرکت، وابسته به کسر حجمی تمامی فازها از طریق خواص ρ و μ می باشد. یکی از محدودیت های این تقریب در مواردی است که تفاوت زیادی بین سرعت فازها وجود داشته باشد و می تواند دقت سرعت های محاسبه شده در نزدیکی سطح مشترک را تحت تأثیر قرار دهد [۱۸].

فصل چهارم

شبیه سازی عددی

۴-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا دینامیک سیالات محاسباتی تعریف شده و به اهمیت آن در علم سیالات اشاره می شود. در علم سیالات سه روش آزمایشگاهی، تئوری و عددی برای مطالعه جریان وجود دارد. یک تحقیق آزمایشگاهی گران، کند و تنها برای یک هدف می باشد درحالی که یک تحقیق عددی ارزان تر و سریع تر بوده و می توان برای اهداف مختلفی از آن استفاده نمود. در یک تحقیق عددی برای اطمینان از نتایج آن نیازمند داده های آزمایشگاهی می باشیم. به همین منظور مدل آزمایشگاهی مورد نظر شرح داده می شود و در ادامه به بررسی نرم افزار انسیس فلوئنت و بیان هندسه مدل و نحوه شبکه بندی آن پرداخته می شود. سپس تنظیمات حل در نرم افزار انسیس فلوئنت مانند تعیین پایداری و ناپایداری، مدل چند فازی، مدل آشفستگی، اعمال شرایط مرزی و روش های گسسته سازی معادلات بیان می شود.

۴-۲ دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

از لحاظ فیزیکی، جریان سیالات از سه اصل اساسی زیر تبعیت می کند:

۱- بقای جرم

۲- بقای مومنتوم

۳- بقای انرژی

این اصول بنیادی را می توان بر حسب معادلات ریاضی بیان کرد، که در کلی ترین شکل خود معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی می باشند. دینامیک سیالات محاسباتی تا اندازه ای هنر جایگزینی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان سیال با اعداد می باشد، و پیشبرد این اعداد در فضا و یا زمان برای به دست آوردن شرح عددی نهایی میدان جریان می باشد.

این یک تعریف فراگیر از CFD نیست، برخی مسائل وجود دارند که اجازه حل فوری میدان جریان بدون پیشبرد در زمان یا مکان را می دهند، و برخی موارد کاربردی وجود دارند که شامل معادلات انتگرالی به جای معادلات دیفرانسیل جزئی می باشند. در هر صورت، در تمامی این نوع مسائل محاسبات عددی و راه حل های عددی در آنها دخیل می باشند. محصول نهایی CFD در واقع یک مجموعه از اعداد، در مقابل شکل بسته حل تحلیلی می باشد.

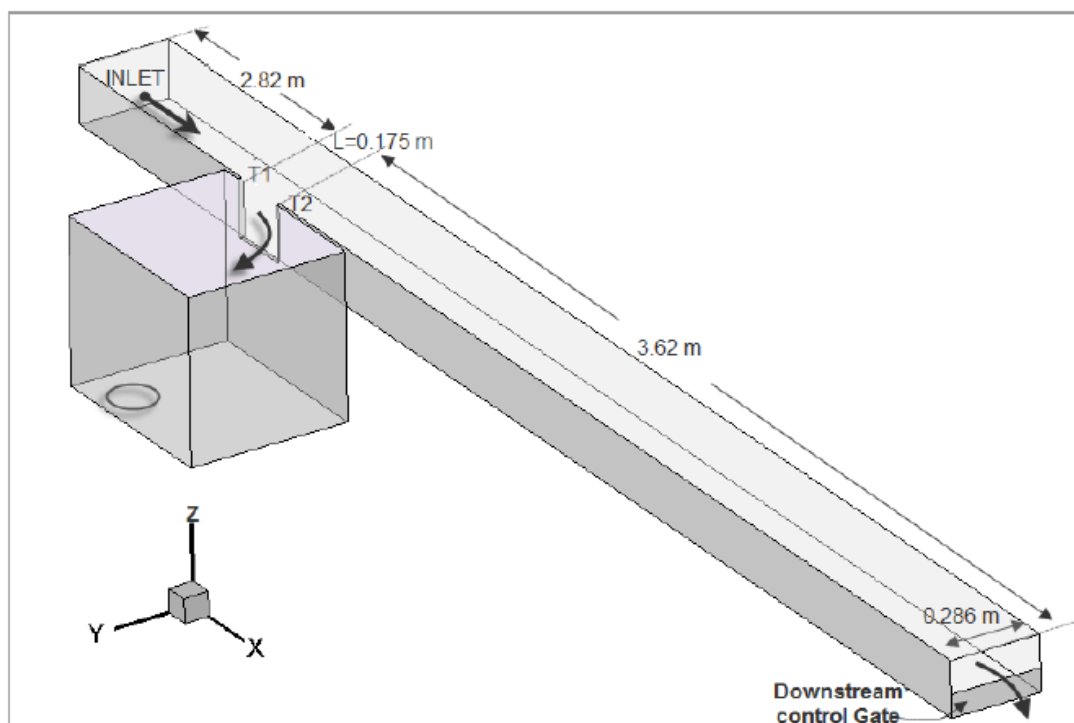
دستگاهی که اجازه رشد عملی را داده است، رایانه دیجیتالی با سرعت بالا می باشد. راه حل های CFD به طور کلی نیاز به هزاران یا حتی میلیون ها محاسبات تکراری اعداد دارند، این امر مهم برای انسان بدون کمک رایانه غیرممکن می باشد. بنابراین، پیشرفت در CFD و کاربرد آن در بسیاری از مسائلی که جزئیات فراوان و پیچیده دارند، رابطه بسیار نزدیکی با پیشرفت در سخت افزار رایانه ای، به ویژه در رابطه با ذخیره سازی و سرعت اجرا دارد [۱۹].

از فواید CFD می توان به چند مورد زیر اشاره کرد:

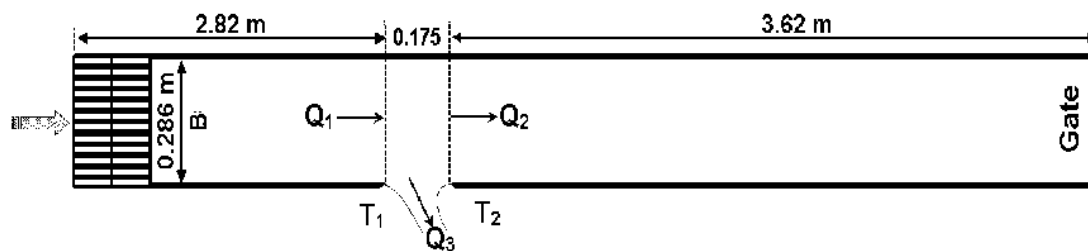
- **هزینه نسبتاً کم:** استفاده از آزمایش های فیزیکی برای به دست آوردن اطلاعات ضروری مهندسی برای طراحی، پر هزینه می باشند، درحالی که مدل های عددی به مراتب کم هزینه تر از مدل فیزیکی بوده و هزینه های آن مربوط به تهیه رایانه ای با قدرت بالا می باشد.
- **سرعت بالا:** شبیه سازی عددی را می توان در یک بازه زمانی کوتاه انجام داد، ولی مدل آزمایشگاهی زمان زیادی برای ساخت آن نیاز می باشد.
- **توانایی در شبیه سازی اکثر شرایط:** بعضی از جریان ها در طبیعت وجود دارند که مدل کردن آنها به سادگی امکان پذیر نمی باشد، مانند جریان مافوق صوت، در شبیه سازی عددی این نوع جریان ها را می توان با استفاده از قواعد تئوری شبیه سازی کرد.

۳-۴ مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد بررسی مدل هیدرولیکی سرریز جانبی ساخته شده در دانشگاه کنکوردیا کانادا می باشد (شکل ۴-۱). این مدل شامل یک کانال رو باز می باشد که در سمت راست آن یک سرریز جانبی با آب پایه صفر قرار دارد. در کانال اصلی، دیوارها از لحاظ هیدرولیکی کاملاً صاف و صیغلی بوده و شیب کف کانال صفر می باشد. سرریز جانبی در فاصله ۲/۸۲ متر از ورودی کانال نصب گشته است. جریان ورودی، از یک منبع با ارتفاع ثابت بعد از گذشتن از یک شبکه ی لانه زنبوری و یک پرده برای کاهش آشفتگی جریان، وارد کانال می شود (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۱: کانال روباز مستطیلی شامل سرریز جانبی [۳]



شکل ۴-۲: طرح شماتیک از کانال با سرریز جانبی مستطیلی (آب پایه صفر) [۳]

۴-۴ آشنایی با نرم افزار انسیس فلوئنت

انسیس فلوئنت برنامه رایانه ای با جدیدترین تکنولوژی برای شبیه سازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی در هندسه های پیچیده می باشد. این نرم افزار در زبان برنامه نویسی C نوشته شده و با استفاده کامل از انعطاف پذیری و قدرت ارائه شده توسط زبان C ساخته شده است. انسیس فلوئنت مسائل جریان را از طریق روش حجم محدود و با استفاده از شبکه های بدون ساختار حل می نماید. انواع مش های پشتیبانی شده عبارتند از دو بعدی (مثلثی^۱ و چهارضلعی^۲)، سه بعدی (چهار وجهی^۳، شش گوشه^۴، هرمی^۵، گوه ای^۶، چند وجهی^۷) و مش مختلط (ترکیبی^۸) می باشد. انسیس فلوئنت همچنین، اجازه اصلاح و یا زمخت کردن مش بر اساس حل جریان را می دهد [۱۸].

-
- ۱- Triangular
 - ۲- Quadrilateral
 - ۳- Tetrahedral
 - ۴- Hexahedral
 - ۵- Pyramid
 - ۶- Wedge
 - ۷- Polyhedral
 - ۸- Hybrid

این نرم افزار قابلیت ساخت هندسه و مش بندی آن را ندارد و باید از یک نرم افزار جانبی استفاده نمود. پس از آنکه مش توسط نرم افزار خوانده شد، عملیاتی مانند تعیین شرایط مرزی، تعریف خواص سیال، اجرای حل، پالایش مش، پس پردازش و مشاهده نتایج در انسیس فلوئنت صورت می گیرد.

برای حل یک مسئله در انسیس فلوئنت باید مراحل زیر انجام شود:

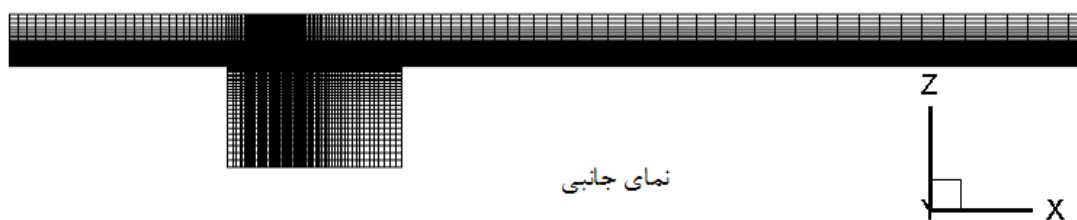
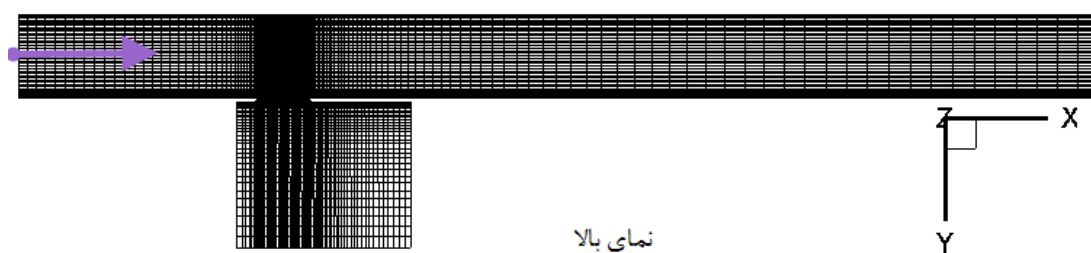
- ۱- تعریف اهداف شبیه سازی
- ۲- ایجاد هندسه مدل و شبکه بندی آن
- ۳- تنظیم حل کننده ها، مدل فیزیکی، شرایط مرزی، شرایط اولیه و ...
- ۴- اجرا و نظارت بر حل
- ۵- بررسی و ذخیره کردن نتایج

۴-۵ هندسه مدل عددی

نرم افزار انسیس فلوئنت قادر به ساخت هندسه و شبکه بندی آن نمی باشد و برای این کار باید از یک نرم افزار جانبی استفاده نمود. در این تحقیق از نرم افزار مدلسازی ANSYS ICEM برای ساخت هندسه و شبکه بندی آن استفاده شده است (شکل ۴-۳). به منظور تعیین ناحیه جدایی^۱ جریان و نقطه سکون^۲، شبکه بندی در ناحیه سرریز جانبی و نواحی نزدیک دیوار ریزتر استفاده شد. لازم به ذکر است که شبکه بندی از بستر کانال تا ارتفاع $z = 11\text{ cm}$ (۱ سانتی متر بالاتر از ارتفاع آب) تا حدی ریزتر می باشد که مدل بتواند تغییرات سطح آب را به خوبی پیش بینی کند. ابعاد شبکه بندی در جدول ۴-۱ آورده شده است.

۱- Separation zone

۲- Stagnation point



شکل ۳-۴ : شبکه بندی مدل

جدول ۱-۴ : ابعاد شبکه بندی

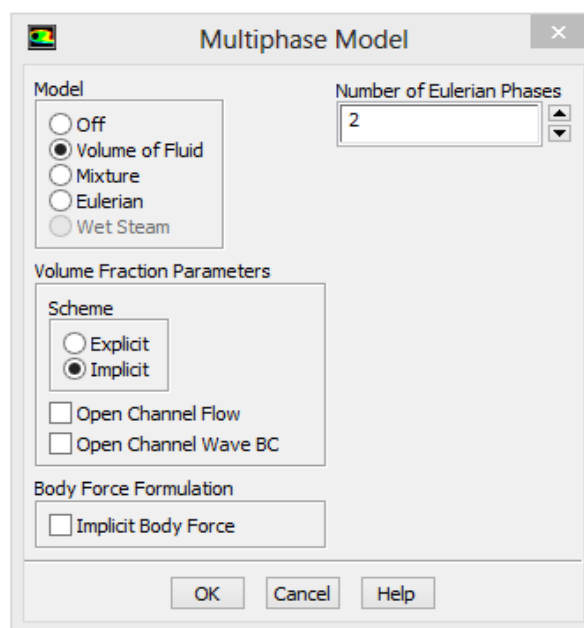
تعداد مش	اندازه ناحیه (متر مکعب)	ناحیه
$318 \times 40 \times 22 = 279840$	$6/355 \times 0/286 \times 0/18 = 0/3271$	کانال اصلی
$50 \times 2 \times 22 = 2200$	$0/175 \times 0/012 \times 0/18 = 0/0003$	خروجی سرریز جانبی
$75 \times 30 \times 30 = 67500$	$0/45 \times 0/5 \times 0/5 = 0/1125$	مخزن سرریز جانبی

۴-۶ تنظیمات حل

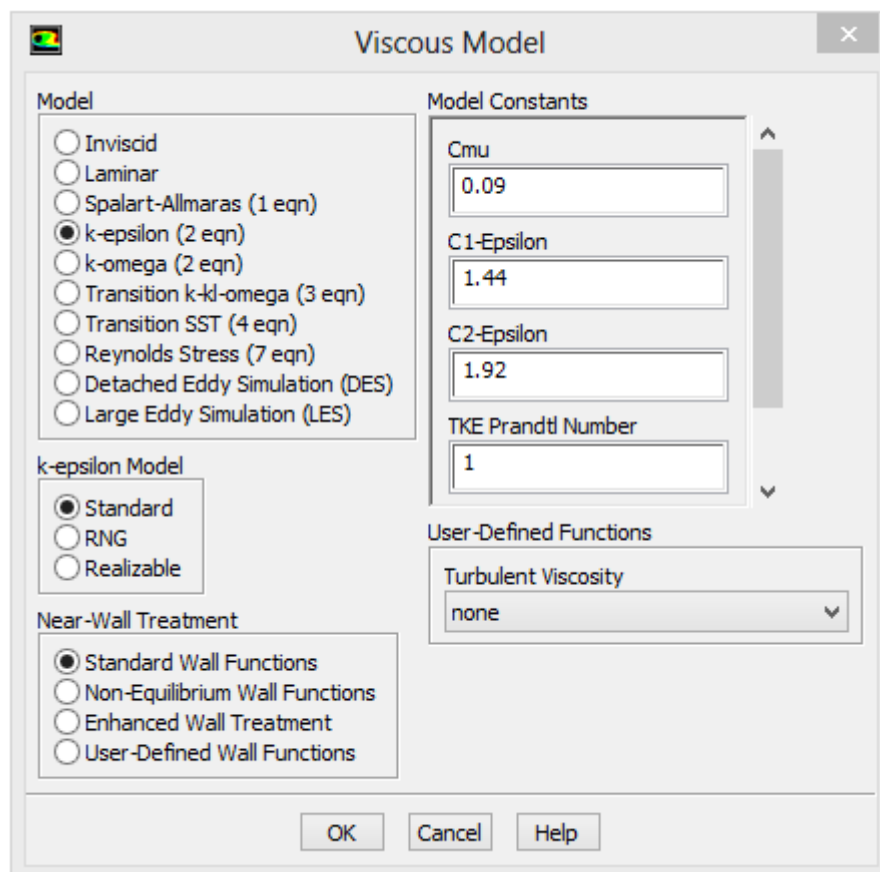
در ابتدا کیفیت مش مورد نظر بررسی می شود. در صورتی که مینیمم حجم مش منفی باشد، باید اصلاح شود. حجم منفی بدین معنی می باشد که یک یا چند سلول به صورت نامناسب به یکدیگر متصل شده اند. حل بر اساس فشار و به صورت وابسته به زمان تنظیم و نیروی ثقلی ۹/۸۰۶ وارد می شود.

۴-۶-۱ تعیین مدل چند فاز و مدل آشفتگی

در ادامه مدل چند فاز و مدل آشفتگی انتخاب می شود. در این نرم افزار چند مدل برای شبیه سازی سطح جریان چند فاز وجود دارد که مدل با تعداد فاز ۲ انتخاب شده و از طرح ضمنی برای حل معادلات استفاده می شود. برای مدل آشفتگی، چندین گزینه وجود دارد که در این پژوهش دو مدل $k-\epsilon$ و مدل $k-\omega$ استاندارد بررسی می شود. در شکل های ۴-۴ و ۴-۵ تنظیمات مربوط به مدل چند فاز و آشفتگی نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ : تنظیمات مدل چند فاز



شکل ۴-۵: تنظیمات مدل آشفتگی

۴-۶-۲ شرایط مرزی

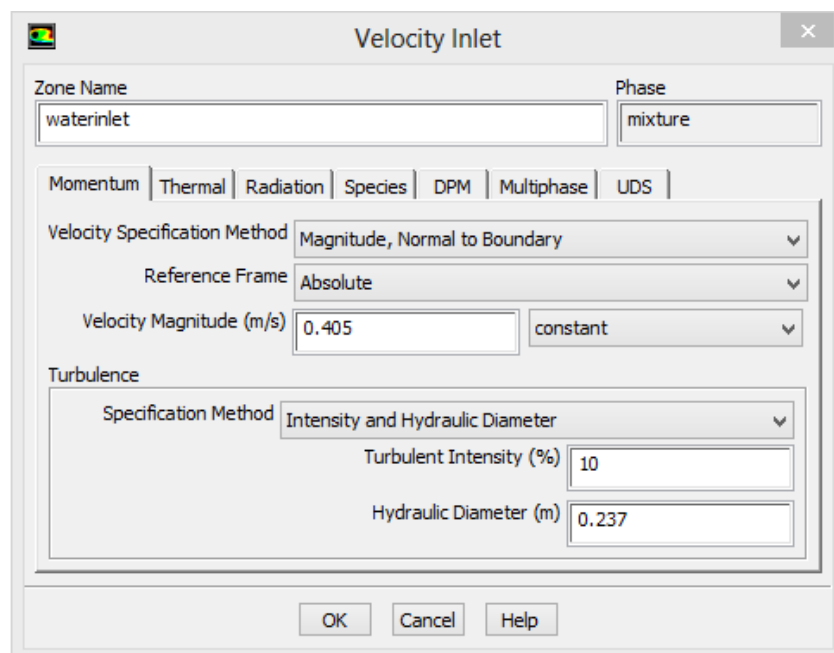
بعد از تعیین مدل چند فازي و آشفتگی، شرایط مرزی تنظیم می شود.

۴-۶-۲-۱ شرایط مرزی سرعت ورودی

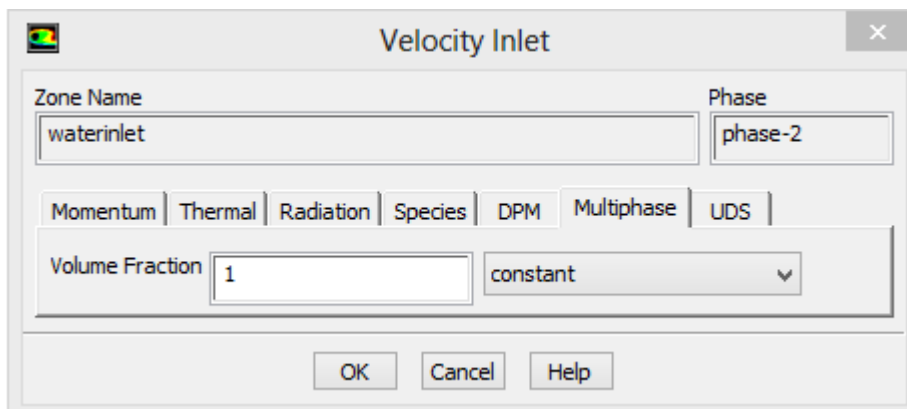
در ورودی میدان، عمق $10/1$ سانتی متر برای فاز آب از هوا جدا شده و شرط مرزی سرعت ورودی به آن اعمال می شود. از ارتفاع $10/1$ تا 18 سانتی متر برای ورودی هوا از شرط مرزی مشابه با آب، سرعت بسیار کوچکی نسبت به سرعت آب، به فاز هوا اعمال شده است.

در پنجره شرایط مرزی سرعت همان طور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، سرعت ورودی آب و مشخصه های آشفتگی به صورت شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی به عنوان شرایط ورودی در فاز مختلط نیاز است. هنگامی که جریان وارد دامنه ورودی و خروجی می شود، انسیس فلونت به مشخصه هایی که آشفتگی را منتقل می کنند، نیاز دارد. چند روش برای انجام این کار وجود دارد که در اینجا از شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی استفاده شده است.

بعد تنظیم فاز مختلط، کسر حجمی فاز یک و فاز دو تعیین می شود. در انسیس فلونت فقط می توان کسر حجمی فاز دوم را تغییر داد، بدین ترتیب که اگر در قسمت کسر حجمی فاز دو، مقدار صفر وارد شود، به این معنا می باشد که در این ناحیه فاز دوم وجود ندارد و فقط فاز یک موجود است، و اگر مقدار یک وارد شود یعنی کل این ناحیه شامل فاز دوم می باشد. بنابراین چون آب به عنوان فاز دوم در نظر گرفته شده، برای ورودی آب کسر حجمی یک و برای ورودی هوا کسر حجمی صفر وارد می شود. در شکل ۴-۷ تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم نشان داده شده است.



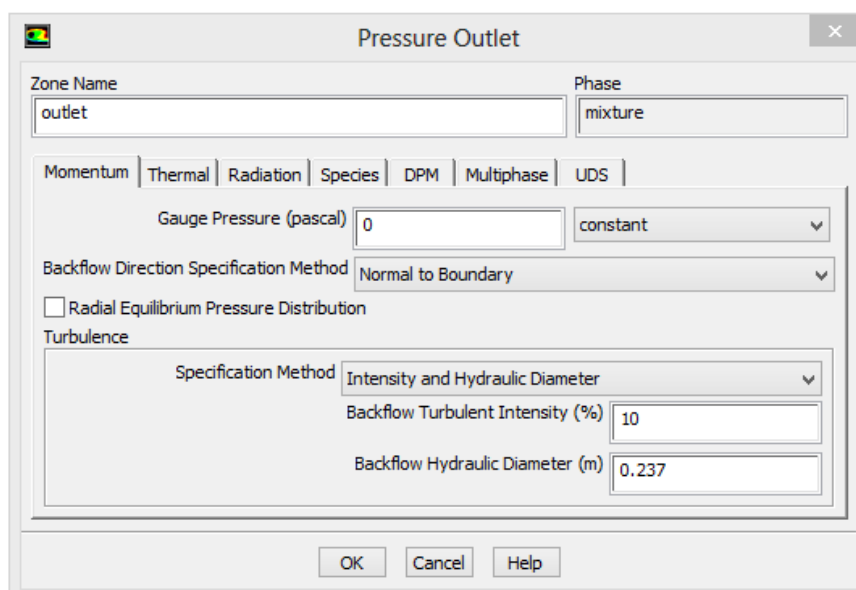
شکل ۴-۶: تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز مختلط



شکل ۴-۷: تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم

۴-۶-۲-۲ شرایط مرزی فشار خروجی و فشار ورودی

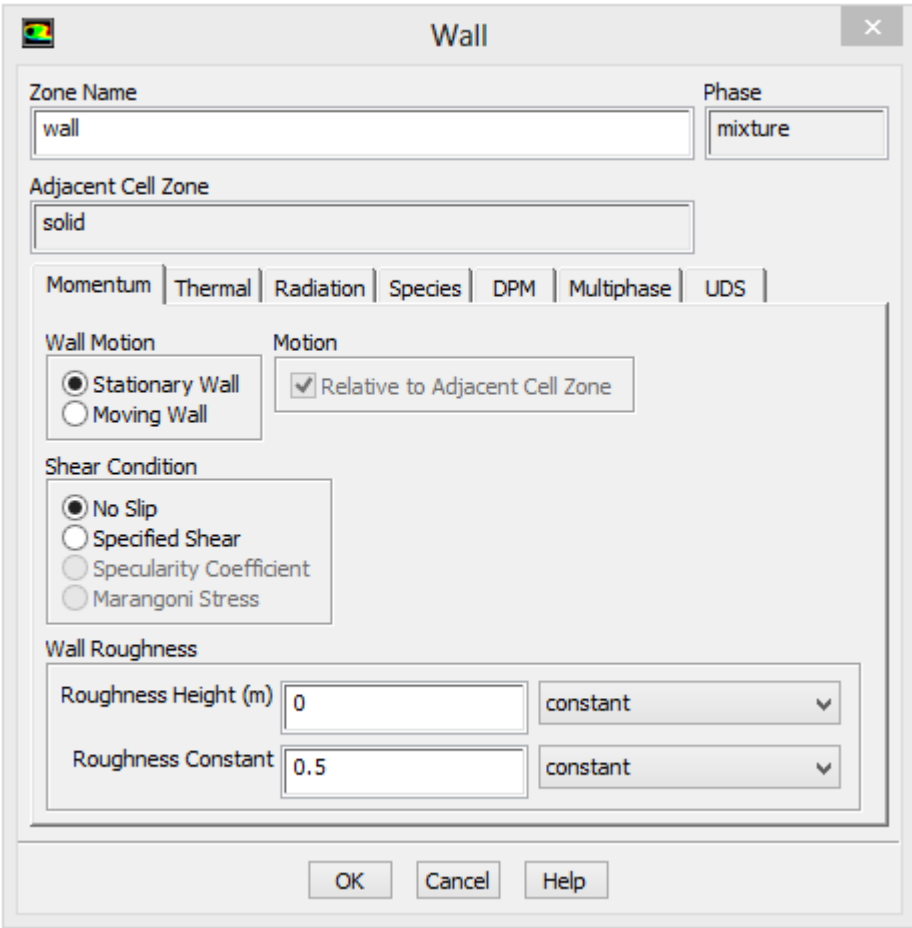
شرایط مرزی فشار خروجی و ورودی باهم یکسان می باشند. در اینجا باید مقدار فشار در مرز وارد شود. برای مرز های خروجی و مرز بالایی مقدار فشار صفر وارد شده است. مشخصه آشفتگی مانند مرز سرعت ورودی تعیین می شود. کسر حجمی نیز در مرزهای خروجی و در مرز بالایی صفر وارد شده است. در شکل ۴-۸ پنجره تنظیمات شرایط مرزی خروجی نشان داده شده است.



شکل ۴-۸: تنظیمات شرایط مرزی فشار خروجی

۴-۶-۲-۳ شرایط مرزی دیوار

برای جداره های جانبی و بستر کانال اصلی، جداره های خروجی سرریز و دیوار های مخزن سرریز از شرایط مرزی دیوار به صورت ثابت و بدون لغزش استفاده می شود. در شکل ۴-۹ تنظیمات مربوط به این مرز نشان داده شده است.



شکل ۴-۹: تنظیمات شرایط مرزی دیوار

۴-۶-۳ روش های حل و گسسته سازی معادلات

۴-۶-۳-۱ روش های حل عددی

انسیس فلونت اجازه انتخاب یکی از دو روش عددی زیر را برای حل مسئله می دهد:

- حل کننده مبتنی بر فشار
- حل کننده مبتنی بر چگالی

در گذشته رویکرد مبتنی بر فشار برای جریان تراکم ناپذیر با سرعت کم توسعه یافته بود، درحالی که رویکرد مبتنی بر چگالی عمدتاً برای جریان تراکم پذیر با سرعت بالا مورد استفاده قرار می گرفت. بااین حال، به تازگی هر دو روش توسعه یافته و دوباره برای حل مسئله فرمول بندی شده و برای طیف گسترده ای از شرایط جریان اعمال می شود.

در هر دو روش میدان سرعت از معادلات حرکت به دست می آید. در رویکرد مبتنی بر چگالی، معادله پیوستگی برای به دست آوردن میدان چگالی مورد استفاده قرار گیرد درحالی که میدان فشار از معادله حالت محاسبه می شود. در رویکرد مبتنی بر فشار، میدان فشار با حل معادله فشار یا فشار اصلاح شده استخراج می شود که با دست کاری معادلات پیوستگی و حرکت به دست می آید. در هر دو مورد روش مبتنی بر حجم کنترل استفاده می شود، که شامل موارد زیر می باشند:

- بخش دامنه به حجم کنترل های گسسته با استفاده از یک شبکه محاسباتی تقسیم می شود.

- انتگرال گیری از معادلات حاکم بر حجم کنترل منفرد برای ساخت معادلات جبری برای گسسته سازی متغیرهای وابسته (مجهولات) مانند سرعت، فشار، درجه حرارت و غیره می باشد.

▪ خطی سازی معادلات گسسته و حل سیستم معادله خطی حاصل برای بدست آوردن مقادیر جدید متغیرهای وابسته می باشد.

دو روش عددی مذکور یک فرآیند گسسته سازی مشابه (حجم محدود) را بکار می گیرند، اما روش مورد استفاده برای خطی سازی و حل معادلات گسسته متفاوت است. با مطالعه راهنمای نرم افزار در این پژوهش روش حل کننده بر پایه فشار^۱ مورد استفاده قرار گرفت چون مدل VOF برای حل کننده های بر پایه دانسیته^۲ در دسترس نمی باشد [۱۸].

۴-۶-۳-۲ گسسته سازی معادله انتقالی کلی

انسیس فلونت با استفاده از روشی که بر اساس حجم کنترل است، اقدام به تبدیل معادله انتقال اسکالر کلی به یک معادله جبری می کند که می توان آن را به صورت عددی حل نمود. این روش حجم کنترل که شامل انتگرال گیری از معادله انتقال مربوط به هر حجم کنترل می باشد، یک معادله گسسته که بیانگر قانون بقاء در حجم کنترل پایه است را نتیجه می دهد. گسسته سازی معادلات حاکم را می توان به راحتی با در نظر گرفتن معادله بقاء ناپایدار برای انتقال کمیت اسکالر ϕ نشان داد. این مورد توسط معادله زیر در فرم انتگرالی برای یک حجم کنترل اختیاری V نشان داده شده است:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4-1)$$

که در آن ρ غلظت، $\vec{v}$ بردار سرعت، $\vec{A}$ بردار مساحت سطح، Γ_ϕ ضریب انتشار برای ϕ ، $\nabla \phi = (\partial \phi / \partial x)i + (\partial \phi / \partial y)j$ گرادیان ϕ و S_ϕ ترم چشمه ϕ در واحد حجم می باشد.

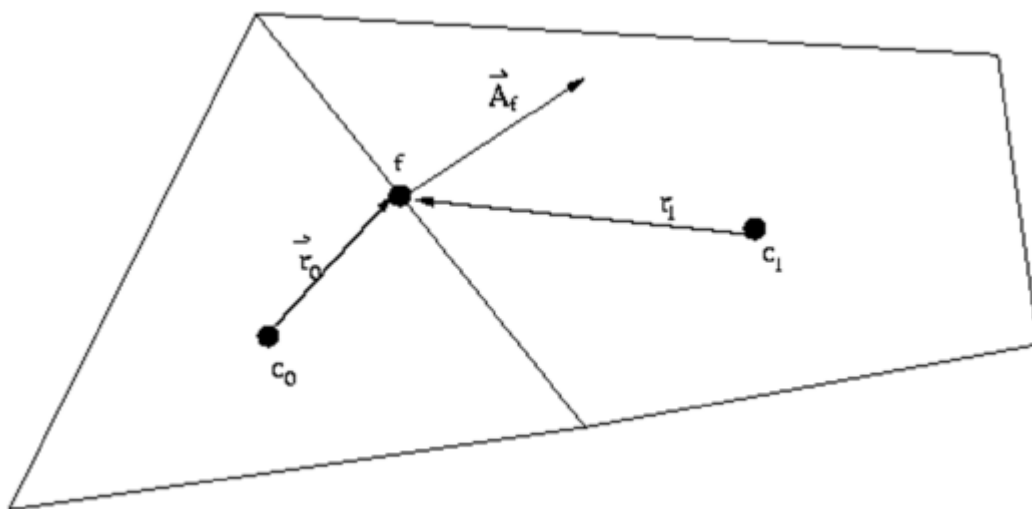
۱- Pressure-based solver

۲- Density-based solvers

معادله ۱-۴ به هر حجم کنترل، یا سلول، مورد استفاده در دامنه محاسباتی اعمال می شود. سلول مثلی نشان داده شده در شکل ۱۰-۴، نمونه ای از چنین حجم کنترل است. گسسته سازی معادله ۱-۴ در یک سلول نتیجه می دهد:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \varphi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_f \nabla \varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V \quad (۲-۴)$$

که در آن N_{faces} تعداد صفحاتی که سلول را احاطه کرده اند، φ_f مقداری از φ که از طریق صفحه f منتقل می شود، $\rho_f \varphi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ شار جرمی عبوری از صفحه، $\vec{A}_f$ سطح صفحه f ، گرادیان در صفحه f و V حجم سلول می باشد [۱۸].



شکل ۱۰-۴: حجم کنترلی که برای نشان دادن گسسته سازی یک معادله انتقال اسکالر استفاده می شود [۱۸]

۴-۶-۳ روش های اعمال شده در مدل

انتخاب روش های گسسته سازی معادلات برای حل عددی آن ها بسیار مهم می باشد. با مطالعه راهنمای نرم افزار برای محاسبات حالت گذرا، به طور کلی طرح ^۱ PISO پیشنهاد می شود. استفاده از این روش علاوه بر اینکه برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت حافظه کمتری را مصرف می کند و سریع تر همگرا می شود، اجازه ی افزایش مقادیر ضرایب زیر تخفیف ^۲ بدون تاثیر بر پایداری را خواهد داد. با بررسی بسیار ضرایب زیر تخفیف برای این پژوهش به صورت زیر اعمال شد [۲۰].

Solution Controls	
Under-Relaxation Factors	
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.4
Volume Fraction	0.5
Turbulent Kinetic Energy	0.7
Turbulent Dissipation Rate	0.7
Turbulent Viscosity	1

شکل ۴-۱۱: ضرایب زیر تخفیف در مدل عددی حاضر

۱- Pressure Implicit with Splitting of Operators

۲- Under-Relaxation

برای گسسته سازی گرادپان، نرم افزار انسیس فلوئنت به صورت پیش فرض در حالت گرین-گوس بر مبنای سلول^۱ قرار دارد. برای محاسبه جریان چند فازی به دلیل پر یا خالی بودن یک سلول از یک فاز پیشنهاد می شود از روش گرین-گوس بر مبنای سلول به جای گرین-گوس بر مبنای نود^۲ استفاده کرد.

برای گسسته سازی معادلات فشار از طرح درون یابی فشار نیروی حجمی یا طرح PRESTO^۳ استفاده شد، که طبق راهنمای نرم افزار برای تمام محاسبات VOF باید از این روش استفاده کرد. برای گسسته سازی معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی از طرح بالادست مرتبه دوم^۴ استفاده شد. طرح های دیگر نیز آزمایش شدند ولی تأثیر زیادی در نتایج نداشته اند.

به منظور مدل سازی پروفیل سطح آب انتخاب طرح گسسته سازی معادلات روش VOF بیشترین تأثیر را در دقت نتایج داشته است، در این پژوهش برای گسسته سازی معادلات کسر حجمی از تمامی طرح های موجود در نرم افزار استفاده شد. در نهایت با بررسی نتایج، طرح بالا دست مرتبه دوم برای این کار انتخاب شد.

برای حل جریان های آشفته بهتر است از حالت وابسته به زمان استفاده شود تا دقت محاسبات افزایش یابد. در نرم افزار انسیس فلوئنت، برای گسسته سازی زمانی در حالت ضمنی دو روش ضمنی مرتبه اول و ضمنی مرتبه دوم وجود دارد. در روش ضمنی مرتبه اول می توان گام های زمانی را بزرگ انتخاب نمود ولی با این کار دقت محاسبات کاهش می یابد. در روش ضمنی مرتبه دوم گام زمانی باید کوچک انتخاب شود. انتخاب گام زمانی کوچک باعث افزایش دقت محاسبات می شود ولی زمان کل حل مسئله را افزایش می دهد. در این پژوهش علاوه بر ترکیب این دو روش که ابتدا از روش ضمنی مرتبه اول برای حل مسئله استفاده شد و سپس از روش ضمنی مرتبه دوم استفاده

۱- Green-Gauss Cell-Based

۲- Green-Gauss Node-Based

۳- PREssure STaggering Option

۴- Second Order Upwind

شد، ابتدا میدان جریان برای جریان لایه ای حل شد و از مقادیر به دست آمده به عنوان شرایط اولیه برای جریان آشفته استفاده شد که با این کار زمان کل حل مسئله کاهش یافت.

۴-۶-۳ شرایط اولیه

شرایط اولیه برای همگرایی مسئله بسیار مهم می باشد. در این پژوهش در ابتدا ناحیه ورودی جریان با مقدار سرعت در ورودی و مقدار ۱ برای انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی آشفتگی مقدار دهی شد. سپس با توجه به این که از روش VOF جهت شبیه سازی جریان دو فازی استفاده شده است و ارتفاع کانال برابر با ۱۸ سانتی متر در نظر گرفته شده است، با توجه به اینکه در کار آزمایشگاهی، عمق ۱۰/۱ سانتی متر در کانال ورودی تثبیت شده است با استفاده از امکانات نرم افزار انسیس فلوئنت عمق مزبور در کانال اصلی به عنوان شرایط اولیه به صورت جز حجم برابر با یک ($VOF=1$) به صورت یک ستون آب ساکن با عمق ثابت به مدل اعمال شده است و بقیه حجم داخلی میدان هوا با جز حجم صفر ($VOF=0$) در نظر گرفته شده است. با این کار مسئله سریع تر همگرا شده و زمان کل حل نیز کاهش چشم گیری می یابد.

برای کاهش زمان حل و همگرایی بیشتر، ابتدا میدان جریان برای جریان لایه ای حل شد و از مقادیر به دست آمده به عنوان شرایط اولیه برای جریان آشفته استفاده شد. در هر دو حالت ابتدا حل مسئله با گام زمانی ۰/۱ آغاز شده که در این گام زمانی از روش ضمنی مرتبه اول برای گسسته سازی زمانی استفاده شده است. سپس مقدار گام زمانی به ۰/۰۰۱ تغییر یافته و در این گام زمانی از روش ضمنی مرتبه دوم برای گسسته سازی زمانی استفاده شده است. نرم افزار از جواب های به دست آمده از گام زمانی ۰/۱ به عنوان شرایط اولیه برای گام زمانی ۰/۰۰۱ استفاده می کند. در گام اول معیار همگرایی برای مقادیر باقیمانده فشار، سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی 10^{-3} و در گام زمانی دوم معیار همگرایی برای مقادیر باقیمانده 10^{-5} در نظر گرفته شده است.

باقی مانده ها در نرم افزار انسیس فلوئنت برای حل کننده بر مبنای فشار از فرمول زیر به دست می آید:

$$R^{\varphi} = \sum_{cells\ P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b - a_P \varphi_P \right| / \sum_{cells\ P} a_P \varphi_P \quad (3-4)$$

که در آن φ_P متغیر کلی در سلول P ، a_P ضریب مرکزی، a_{nb} ضریب تاثیر سلول های مجاور، φ_{nb} متغیر کلی در سلول های مجاور، b سهم قسمت ثابت عبارت چشمه، S_c ، در $S = S_c + S_P \varphi$ می باشد [۱۸].

فصل پنجم

تجزیه و تحلیل نتایج

۵-۱ مقدمه

یکی از عوامل مهمی که در صحت شبیه سازی عددی تأثیرگذار است، تعیین مدل آشفتگی مناسب می باشد. این مدل آشفتگی باید عملی باشد، به این معنی که در عمل بتوان آن را برای مسئله مورد نظر با حجم و ابعاد موجود استفاده نمود. با توجه به ابعاد سرریز جانبی و همچنین مقدار عدد رینولدز، از مدل های دو معادله ای برای این تحقیق استفاده شد. از میان مدل های دو معادله ای، معروف ترین و پرکاربردترین آنها در این تحقیق مورد استفاده و بررسی قرار گرفت. این معادلات عبارتند: از مدل $k-\varepsilon$ ، مدل $k-\omega$ و مدل $k-\varepsilon$ RNG. در این تحقیق هر بار از یکی از این مدل ها برای شبیه سازی سرریز استفاده گردید و جواب ها با جواب های آزمایشگاهی مقایسه گردید تا مشخص شود کدام مدل آشفتگی برای سرریزهای جانبی مناسب تر می باشد. نتایج این تحقیق می تواند برای سایر طراحان سرریزهای جانبی مفید باشد تا مستقیماً از بهترین مدل آشفتگی برای شبیه سازی عددی استفاده نمایند. معمولاً هر مدل آشفتگی در مسائل خاصی جواب می دهد و برای هر مسئله باید بهترین مدل آشفتگی تعیین گردد. برای بررسی اعتبار جواب های یک مسئله عددی آنها را با داده های یک تحقیق آزمایشگاهی مقایسه می کنند. برای بررسی صحت عملکرد مدل های عددی در این پایان نامه از مدل آزمایشگاهی سرریز جانبی ساخته شده در دانشگاه کنکوردیا کانادا استفاده شده (شکل ۴-۱) و همچنین برای بررسی پارامتر نقطه سکون علاوه بر مقایسه با مدل آزمایشگاهی از تئوری پیشنهادی Michell در سال (۱۸۹۰) [۲۱] که بر اساس جریان ایده ال ارائه شده است، نیز استفاده می گردد. در این فصل ابتدا چگونگی بی بعد سازی پارامتر ها بیان شده سپس به بررسی صحت سنجی جواب مدل های عددی برای تعیین نقطه سکون با جواب های آزمایشگاهی و تئوری پیشنهادی Michell می پردازیم.

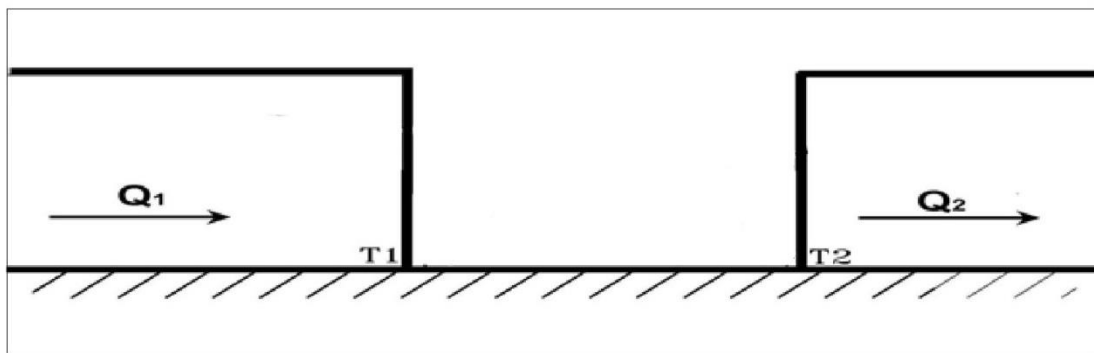
در ادامه پروفیل های سطح جریان به دست آمده از مدل های عددی با مدل آزمایشگاهی در مقاطع مشخص مورد بررسی قرار می گیرد و سپس به بررسی پارامتر مهم ناحیه جدایی جریان در کانال سرریز می پردازیم.

۲-۵ بی بعد سازی پارامترها

کل دبی ورودی به داخل کانال، دبی در کانال پایین دست سرریز و میزان دبی خروجی از روی سرریز به ترتیب با پارامتر های Q_1 ، Q_2 ، Q_3 مشخص می شوند. پارامتر Q_R را نرخ دبی می نامیم و از تقسیم Q_3 بر Q_1 به دست می آید.

تمام فاصله ها در راستای X ، Y ، Z با تقسیم بر عرض کانال ($B=0.286$) بی بعد شده و مختصات بی بعد شده را با X^* ، Y^* ، Z^* نمایش می دهیم. نقطه انتهایی در پایین دست سرریز T_2 (شکل ۱-۵) را مبدأ تمام محور های مختصات قرار می دهیم و در آن :

$$X^* = Y^* = Z^* = 0$$



شکل ۱-۵ : مشخصات سرریز از نمای کناری [۳]

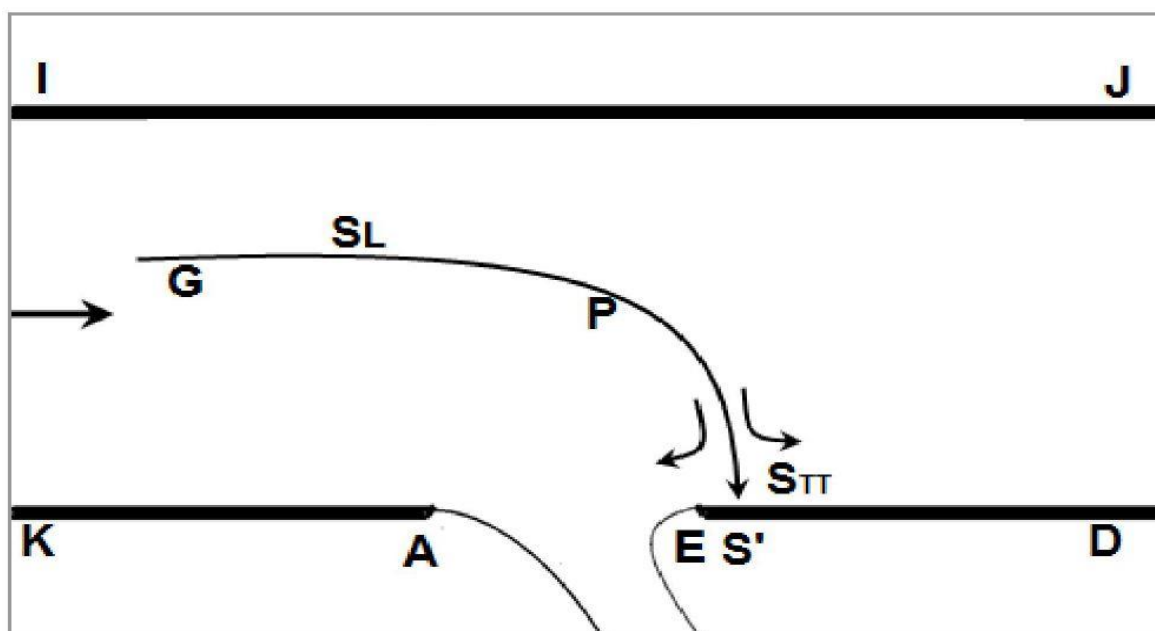
۳-۵ مقایسه نقطه سکون

۱-۳-۵ مقایسه بین مدل تئوری و آزمایشگاهی

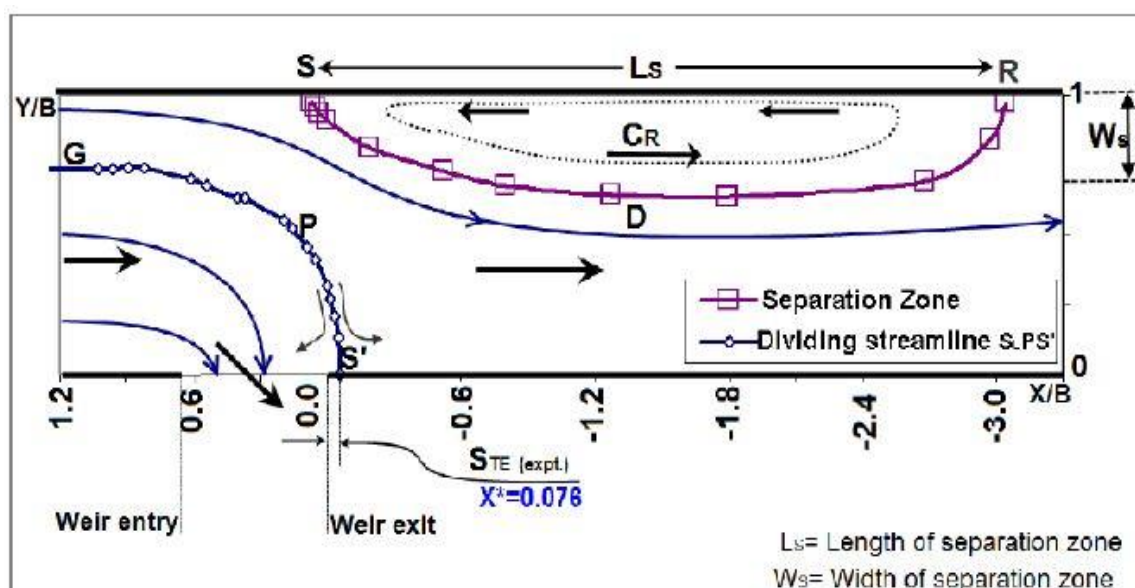
شکل ۲-۵ نشان دهنده مشخصات سرریز جانبی دو بعدی برای مدل تئوری Michell می باشد. در این شکل S_L معرف خط جریان تقسیم کننده می باشد که جریان در سمت راست آن از سرریز خارج شده و جریان در سمت چپ آن به سمت پایین دست کانال هدایت می شود. S_{TT} معرف نقطه سکون تئوری می باشد که در آن نقطه سرعت جریان به صفر می رسد. برای مدل تئوری Michell این نقطه در ارتفاع $Z=6$ سانتی متر در فاصله $X^*=0.06$ از لبه T_2 قرار دارد.

شکل ۳-۵ نشان دهنده مشخصات سرریز جانبی برای مدل آزمایشگاهی می باشد. مقدار به دست آمده برای فاصله نقطه سکون آزمایشگاهی S_{TE} از لبه T_2 در ارتفاع $Z=6$ سانتی متر برابر $X^*=0.076$ می باشد. همانطور که مشخص است مقدار به دست آمده برای فاصله نقطه سکون از لبه T_2 در مدل تئوری، تطبیق خوبی با مقدار به دست آمده در مدل آزمایشگاهی دارد. اختلاف جزئی بین این دو مدل را می توان منوط به دلایل زیر دانست :

۱. جریان در کانال آزمایشگاهی آزاد است و در نزدیکی سرریز جانبی حالت دو بعدی ندارد.
۲. مقدار تعیین شده برای نقطه سکون از معادله تئوری بر پایه جریان ایده آل بوده است.



شکل ۵-۲: مشخصات سرریز برای مدل تئوری [۳]



شکل ۵-۳: مشخصات سرریز برای مدل آزمایشگاهی [۳]

۵-۳-۲ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و عددی

برای مقایسه دقیق تر محل نقطه سکون بین دو مدل آزمایشگاهی و عددی، این مقایسه را در دو ارتفاع مختلف مورد بررسی قرار می دهیم.

شکل ۵-۴ (الف) نشان دهنده جهت حرکت بردارهای سرعت، ناشی از سرعت محوری u و سرعت جانبی w ، در ارتفاع $Z=6$ سانتی متر می باشد. همانطور که پیش تر گفته شد مکان S_{TE} در ارتفاع $Z^*=0/209$ به فاصله $X^*=0/076$ از لبه T_p قرار دارد.

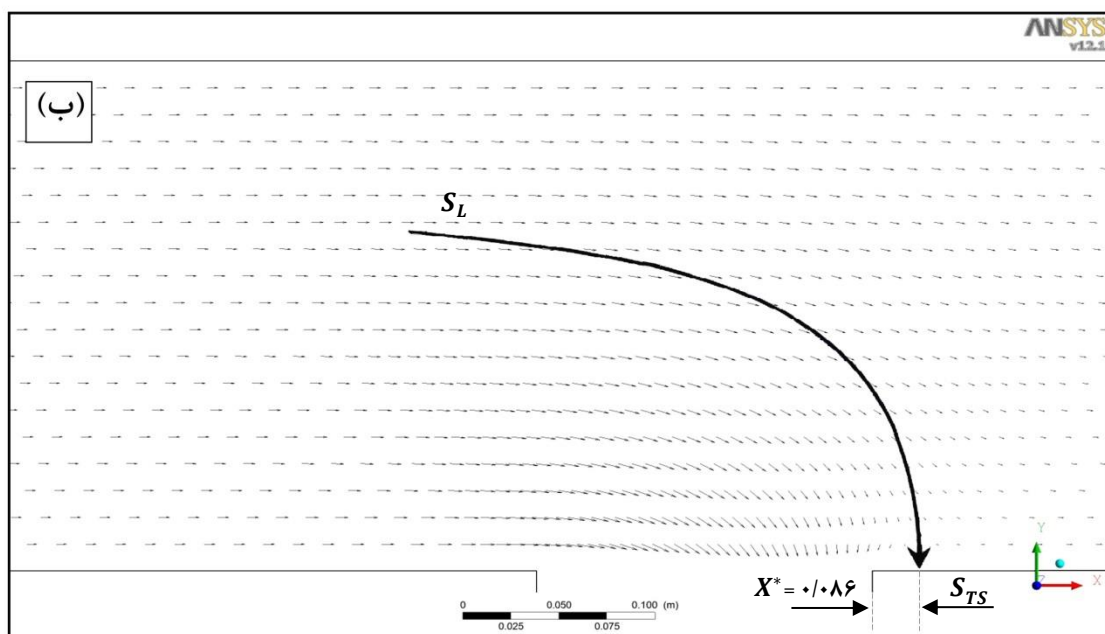
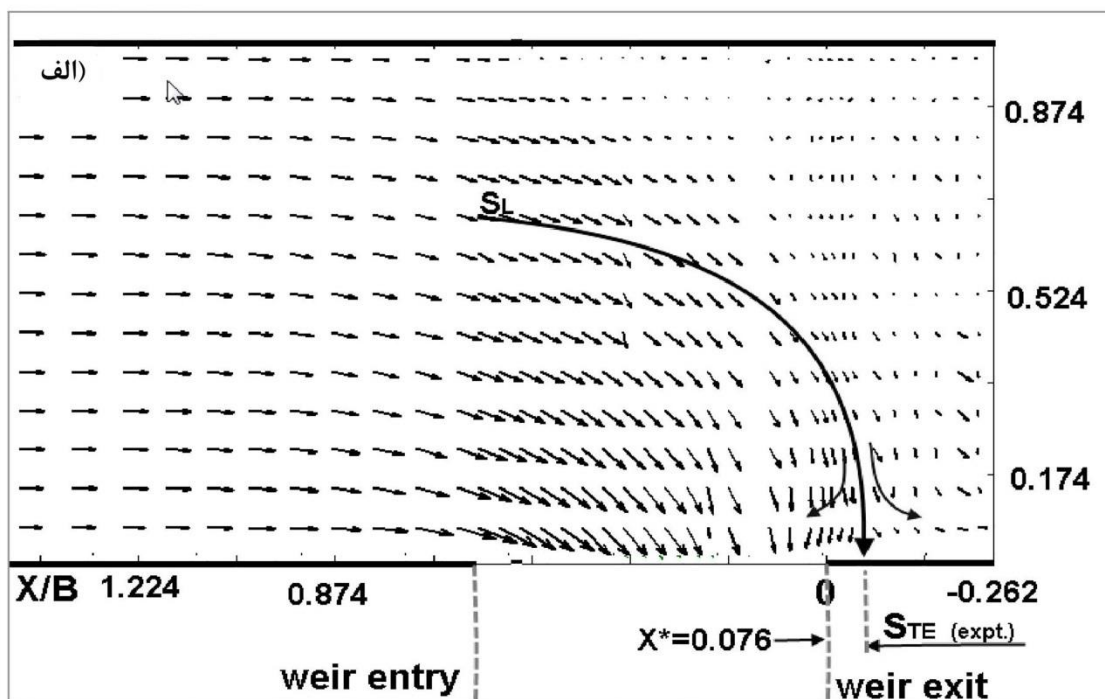
شکل های ۵-۴ (ب، ج، د) نشان دهنده جهت حرکت بردارهای سرعت با استفاده از مدل سازی عددی با مدل های آشفتگی به ترتیب مدل $k-\varepsilon$ ، مدل $RNG\ k-\varepsilon$ و مدل $k-\omega$ می باشد.

فاصله نقطه سکون مدل عددی S_{TS} برای مدل های آشفتگی مختلف :

جدول ۵-۱: مقادیر اندازه گیری شده برای نقطه سکون در $Z^*=0/209$

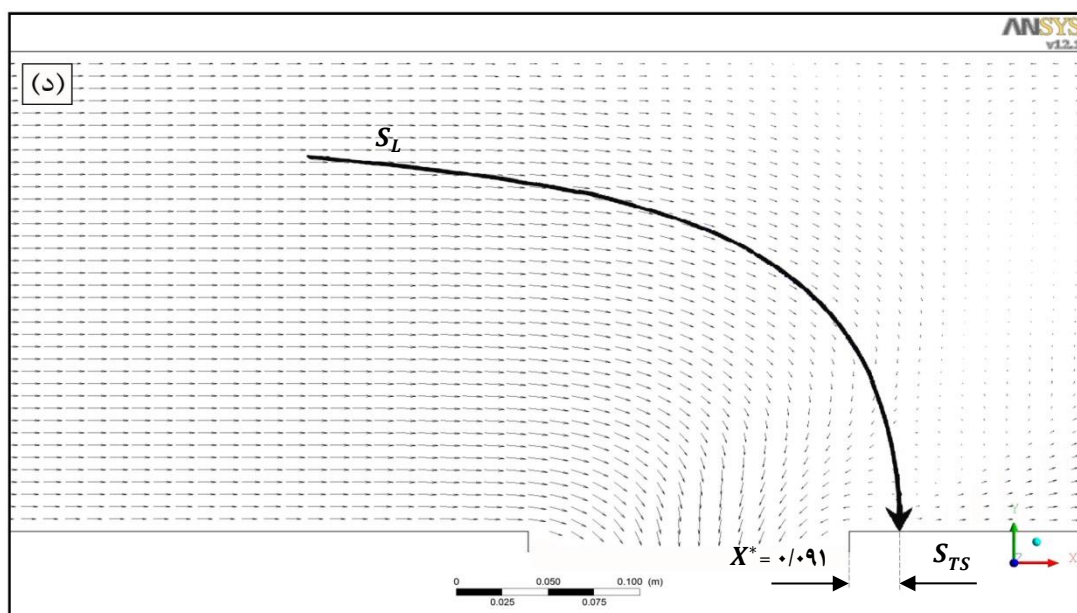
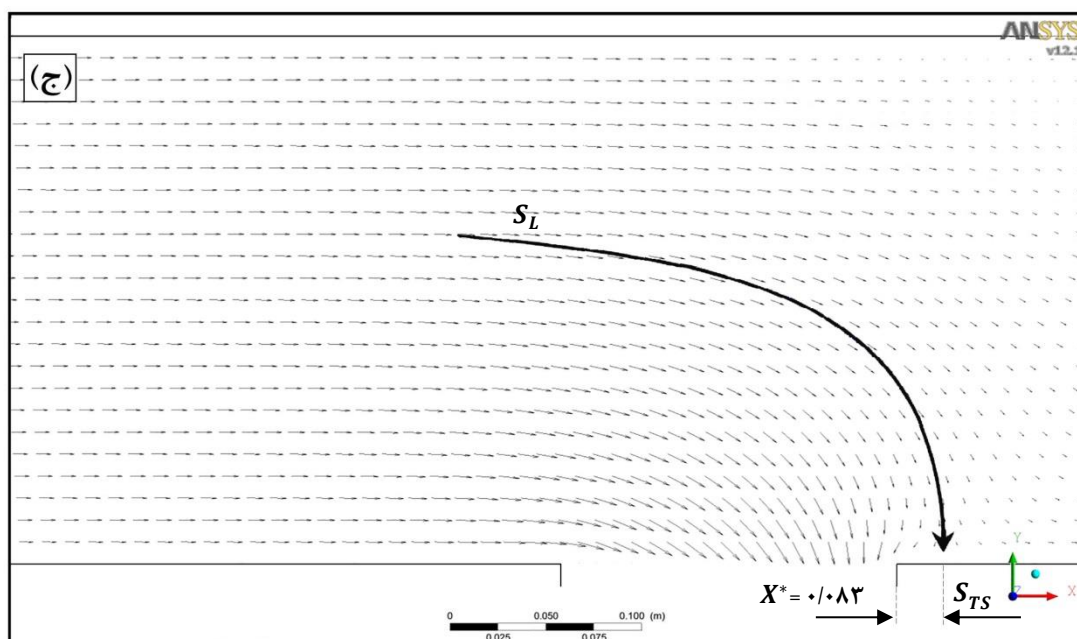
آزمایشگاهی	$k-\omega$	$RNG\ k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$	
۰/۰۷۶	۰/۰۹۱	۰/۰۸۳	۰/۰۸۶	فاصله نقطه از T_p
_____	۱۹/۷۴	۹/۲۱	۱۳/۱۶	خطای نسبی %

همانطور که مشخص است نتایج به دست آمده از مدل عددی در ارتفاع $Z^*=0/209$ چه از لحاظ رسم بردارهای سرعت و چه از لحاظ مقادیر نقطه سکون تطبیق خوبی با مدل آزمایشگاهی داشته است.



شکل ۴-۵: ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0.209$

الف) مدل آزمایشگاهی ($Q_R = 0.792$) - ب) مدل عددی $k-\varepsilon$ ($Q_R = 0.805$)



شکل ۴-۵: ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0.209$

(ج) مدل عددی $k-\varepsilon$ RNG ($Q_R = 0.185$) - (د) مدل عددی $k-\omega$ ($Q_R = 0.185$)

شکل ۵-۵ (الف) نشان دهنده جهت حرکت بردارهای سرعت، ناشی از سرعت محوری u و سرعت جانبی w ، در ارتفاع $Z=7$ سانتی متر می باشد. مکان S_{TE} در ارتفاع $Z^*=0.244$ به فاصله $X^*=0.070$ از لبه T_p قرار دارد.

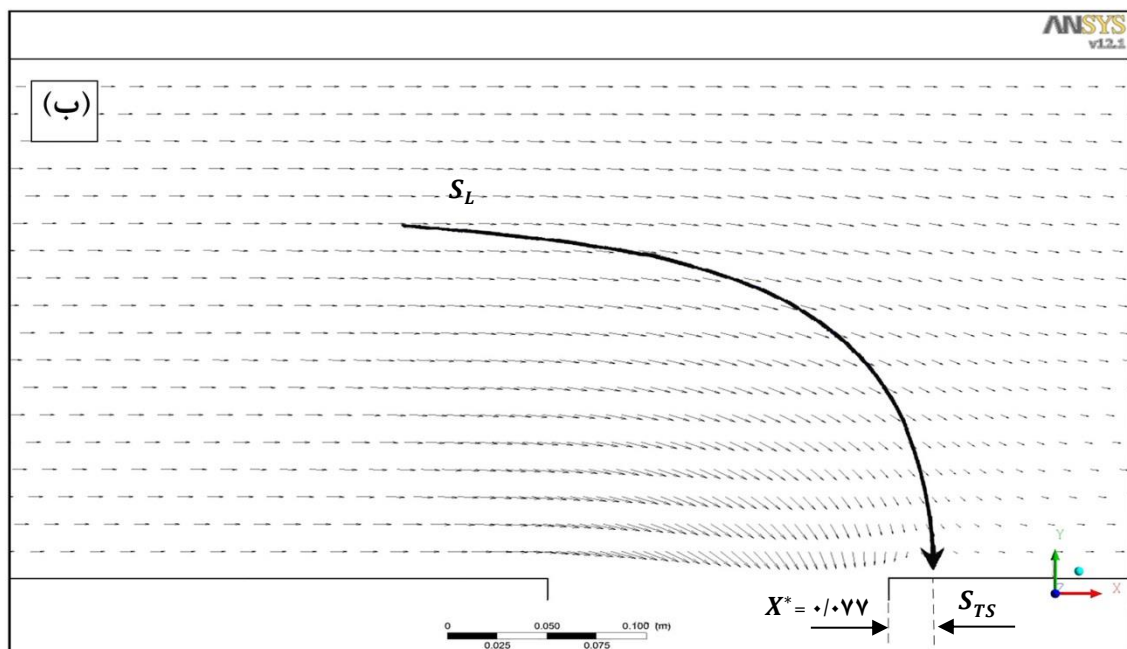
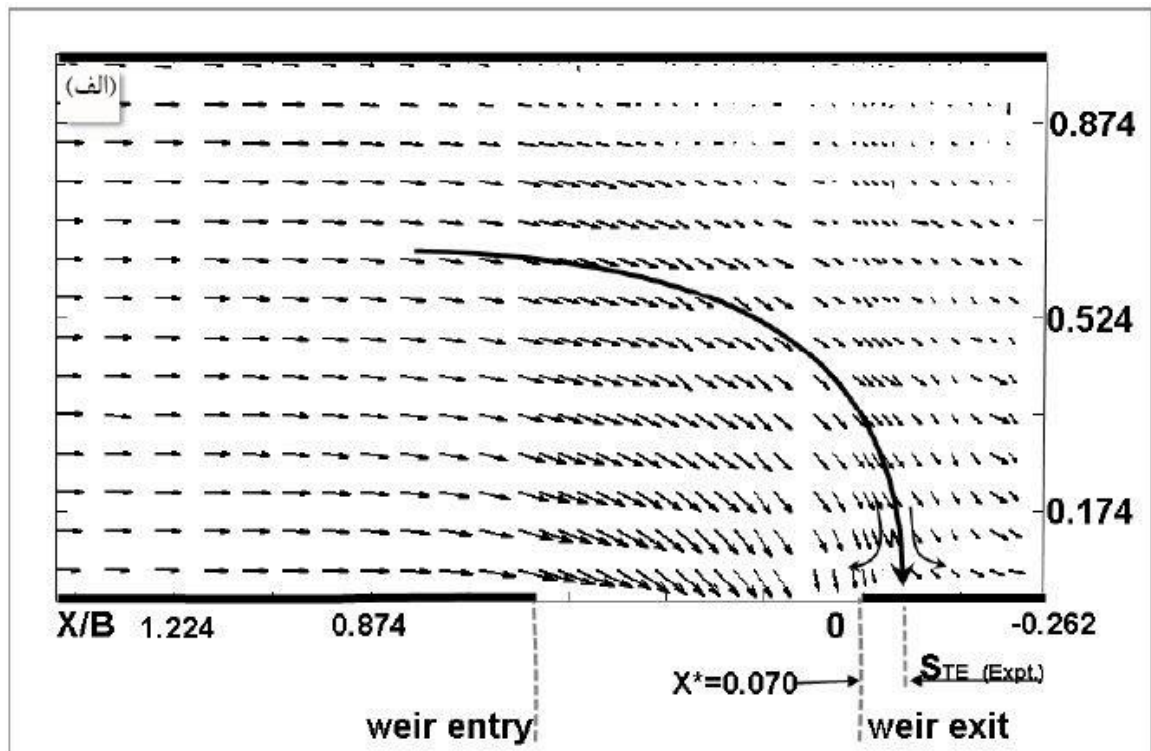
شکل های ۵-۵ (ب، ج، د) نشان دهنده جهت حرکت بردارهای سرعت با استفاده از مدل سازی عددی با مدل های آشفتگی به ترتیب مدل $k-\varepsilon$ ، مدل $RNG\ k-\varepsilon$ و مدل $k-\omega$ می باشد.

فاصله نقطه سکون مدل عددی S_{TS} برای مدل های آشفتگی مختلف :

جدول ۵-۲: مقادیر اندازه گیری شده برای نقطه سکون در $Z^*=0.244$

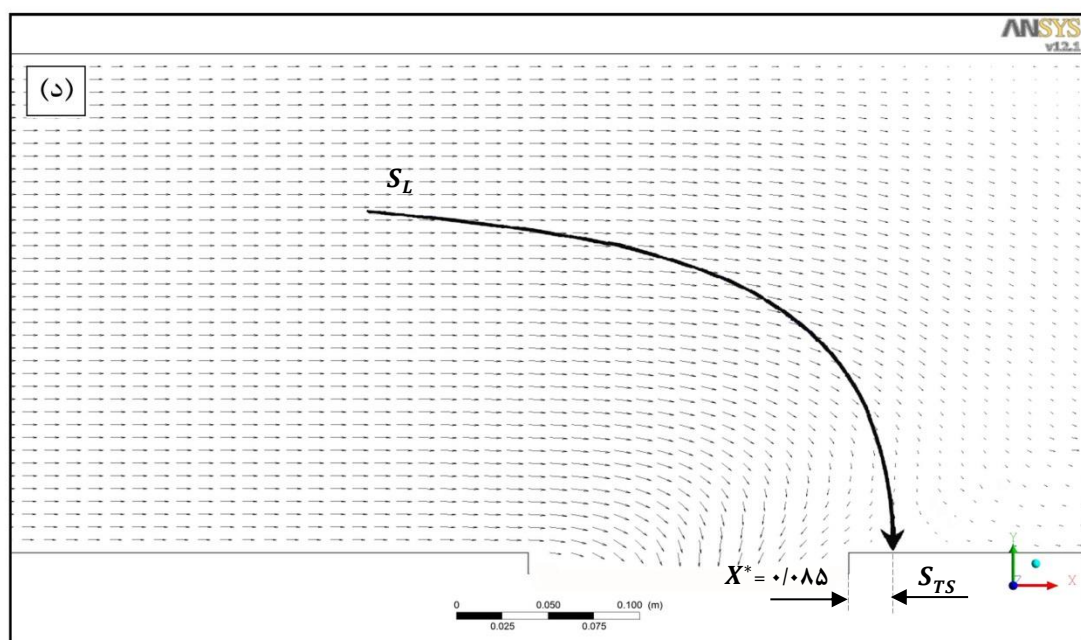
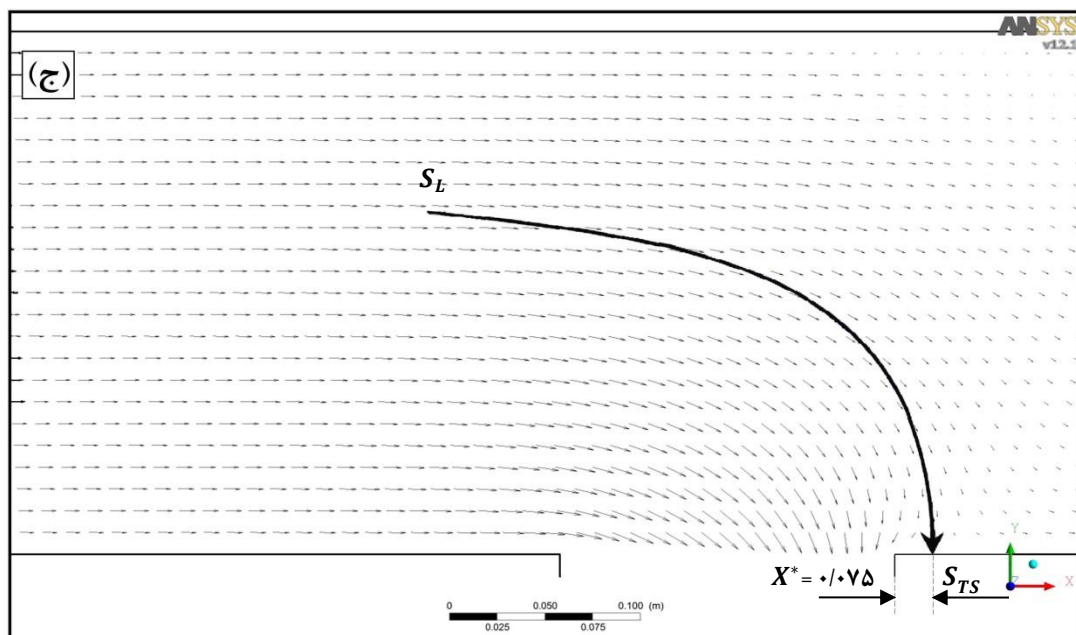
آزمایشگاهی	$k-\omega$	$RNG\ k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$	
۰/۰۷۰	۰/۰۸۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	فاصله نقطه از T_p
_____	۲۱/۴۳	۷/۱۴	۱۰	خطای نسبی %

همانطور که مشخص است نتایج به دست آمده از مدل عددی در ارتفاع $Z^*=0.244$ چه از لحاظ رسم بردارهای سرعت و چه از لحاظ مقادیر نقطه سکون تطبیق خوبی با مدل آزمایشگاهی داشته است.



شکل ۵-۵: ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0.244$

الف) مدل آزمایشگاهی ($Q_R = 0.792$) - ب) مدل عددی $k-\epsilon$ ($Q_R = 0.805$)



شکل ۵-۵: ترسیم بردارهای سرعت در ارتفاع $Z^* = 0.244$

(ج) مدل عددی $k-\varepsilon$ RNG ($Q_R = 0.085$) - (د) مدل عددی $k-\omega$ ($Q_R = 0.085$)

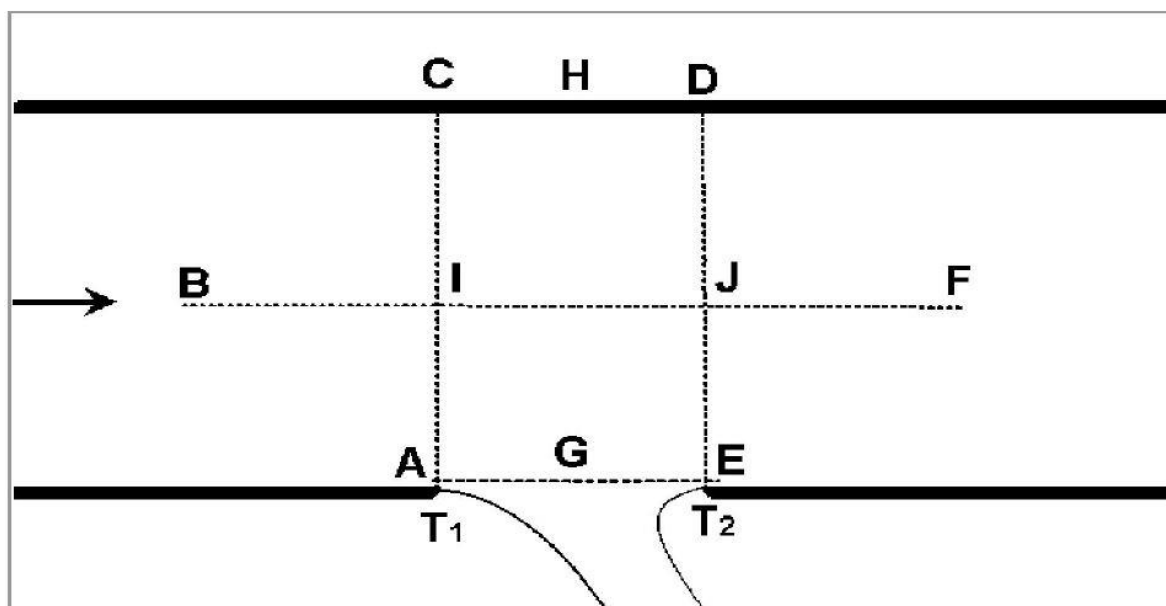
۴-۵ مقایسه پروفیل سطح جریان

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سرریز تعیین پروفیل سطح آب می باشد. بدین منظور برای تعیین پروفیل سطح آب با استفاده از مدل عددی و صحت سنجی آن با مدل آزمایشگاهی مقاطعی را در ناحیه نزدیک به سرریز جانبی در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۵).

شکل های ۷-۵ (الف، ب، ج) ارتفاع بی بعد جریان (Z/B) که تابعی از فاصله بی بعد (Y/B) می باشد را در سه مقطع (A-C)، (G-H) و (D-E) نشان می دهد.

شکل های ۸-۵ (الف، ب) پروفیل سطح آب را در امتداد سرریز در مقاطع (B-I-J-F) و (A-G-E) را نشان می دهد.

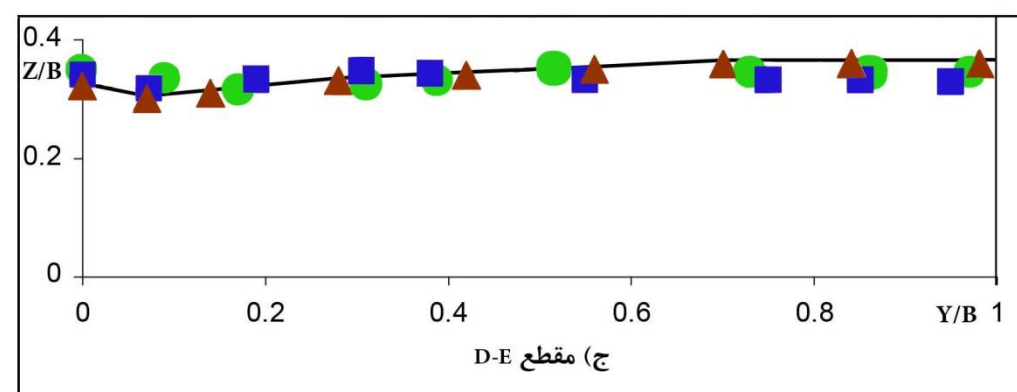
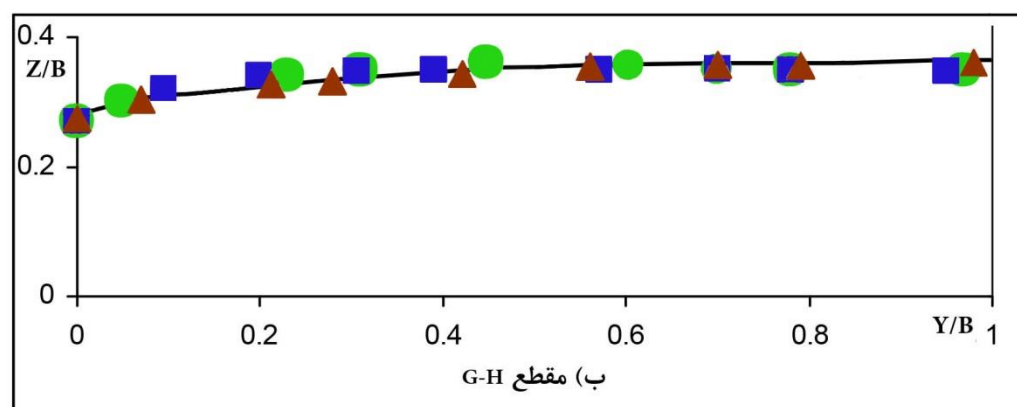
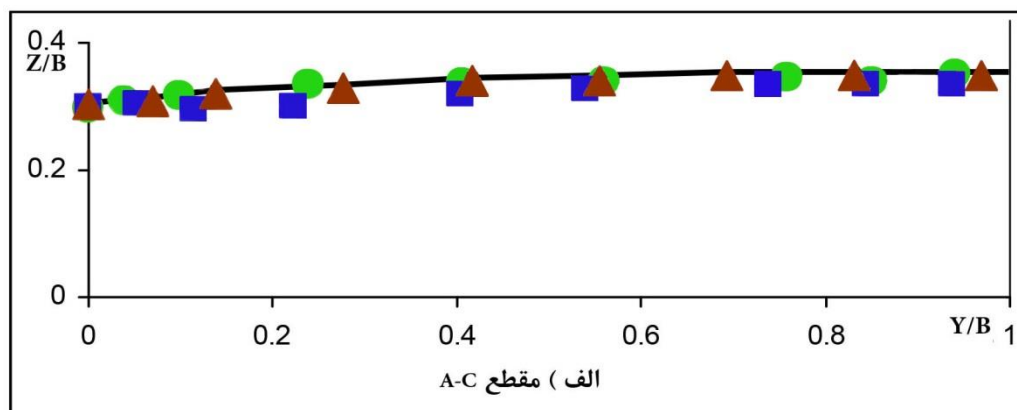
همانطور که در قسمت (۳-۲-۲) اشاره شد به دلیل اینکه بین ابتدا و انتهای سرریز معادله انرژی مخصوص حاکم است، واضح است که در چنین شرایطی و با توجه شیب کانال، عمق جریان به تدریج از مقطع T_1 به مقطع T_2 افزایش پیدا خواهد کرد. و همانطور که از گراف ها و میزان خطا های به دست آمده در جدول ۳-۵ مشخص است، مدل های عددی $k-\varepsilon$ RNG و $k-\omega$ توانستند تطبیق بسیار خوبی با پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آزمایشگاهی داشته باشند. اما مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ نتوانست به دقت دو مدل آشفتگی دیگر پروفیل سطح آب را در دهانه سرریز تخمین بزند اما از لحاظ شکل کلی توانست افزایش ارتفاع بین دو مقطع را نشان دهد.



شکل ۵-۶: مقاطع مشخص شده برای نشان دادن پروفیل سطح آب [۳]

جدول ۵-۳: درصد میزان خطا پروفیل سطح آب برای هر مدل آشفتگی

	$k-\varepsilon$	RNG $k-\varepsilon$	$k-\omega$
A-C	۳/۳۳	۱/۶۷	۱/۶۷
G-H	۳/۰۵	۲/۱۷	۱/۲۳
D-E	۳/۶۷	۲/۸۳	۱/۶۷
B-I-J-F	۱/۸۳	۰/۶۷	۱/۲۳
A-G-E	۴/۲۳	۱/۲۳	۱/۸۳

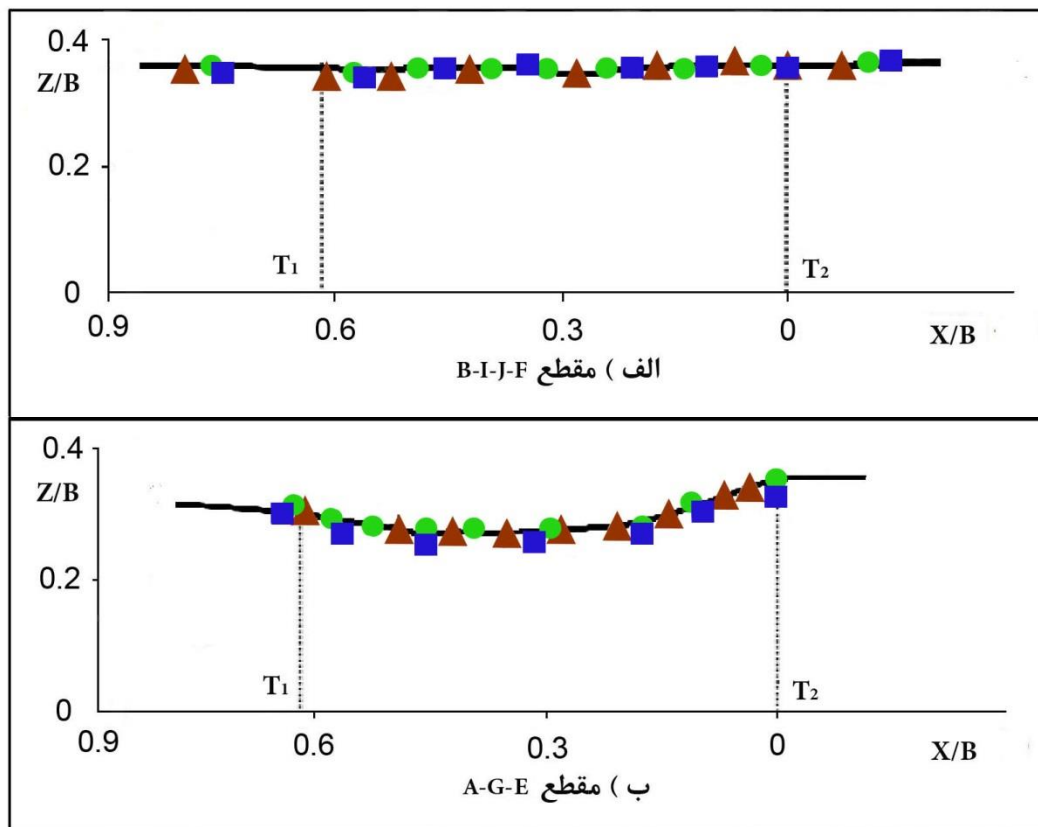


شکل ۵-۷: مقاطع پروفیل سطح آب در عرض کانال

الف (مقطع ابتدای سرریز - ب) مقطع مرکز سرریز - ج) مقطع انتهای سرریز

■ مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ، ● مدل آشفتگی $RNG\ k-\varepsilon$ ، ▲ مدل آشفتگی $k-\omega$

— مدل آزمایشگاهی



شکل ۵-۸: مقاطع پروفیل سطح آب در امتداد کانال

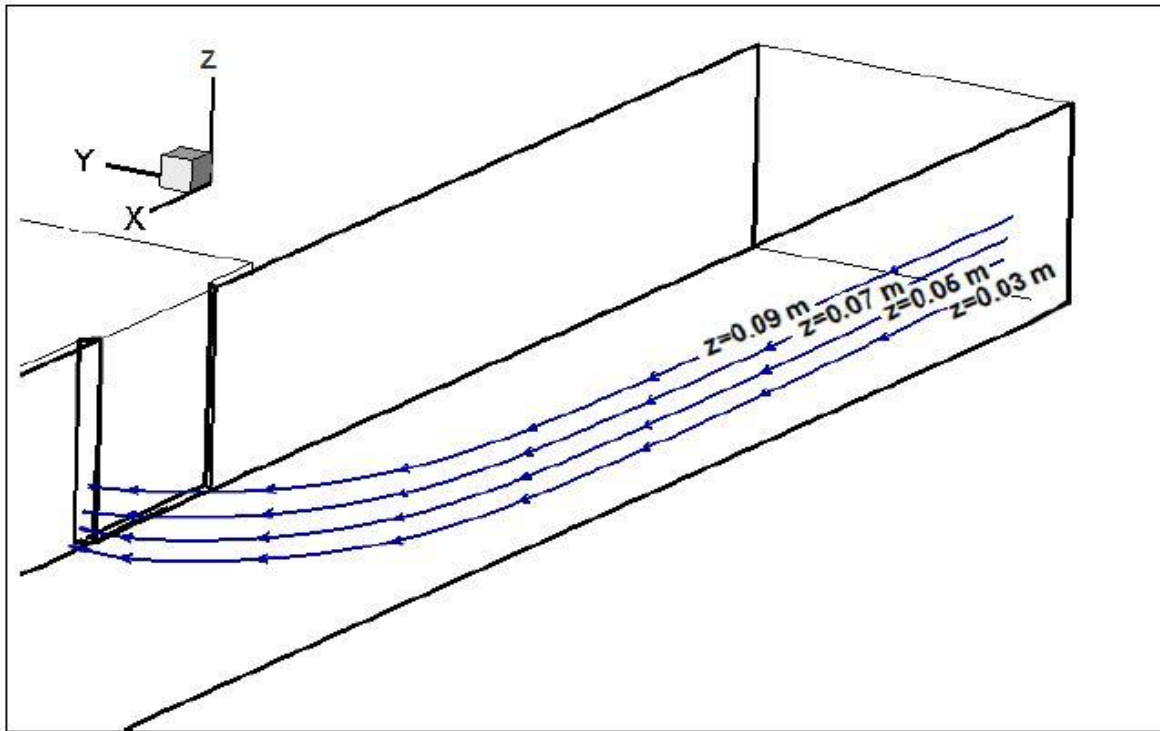
الف) در امتداد مرکز کانال - ب) در امتداد دهانه سرریز

■ مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، ● مدل آشفتگی $RNG\ k-\epsilon$ ، ▲ مدل آشفتگی $k-\omega$

— مدل آزمایشگاهی

۵-۵ صفحه تقسیم کننده جریان

جریان با نزدیک شدن به دهانه سرریز جانبی در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم می شود، قسمتی از جریان از سرریز خارج شده و بقیه جریان در کانال اصلی پایین دست جریان می یابد. قسمتی از جریان که وارد سرریز می شود به وسیله صفحه تقسیم کننده جریان، از قسمتی از جریان که در پایین دست ادامه دارد جدا می شود. صفحه تقسیم کننده جریان شامل خطوط جریان در ارتفاع های مختلف هستند که به دهانه انتهایی سرریز برخورد کرده و نقاط سکون را در ارتفاع های مختلف مشخص می کنند. شکل (۵-۹) نشان دهنده صفحه تقسیم کننده جریان در مدل آزمایشگاهی می باشد. همانطور که در شکل مشخص است، این خطوط جدا کننده با افزایش ارتفاع، به سمت لبه انتهایی سرریز T_2 نزدیکتر می شوند. در قسمت ۵-۳-۲ برای تعیین نقطه سکون با استفاده از مدل عددی دو ارتفاع $Z=6$ و $Z=7$ سانتی متر در نظر گرفته شد. در تمام مدل های آشفته گی فاصله نقطه سکون از لبه انتهایی سرریز T_2 با افزایش ارتفاع، کمتر شد و این نشان دهنده این حقیقت است که مدل عددی توانسته الگوی صفحه تقسیم کننده جریان را به خوبی شبیه سازی کند.



شکل ۵-۹: صفحه تقسیم کننده جریان در مدل آزمایشگاهی [۳]

۵-۶ ناحیه جدایی جریان

الگوی جریان ناشی از احداث سرریز جانبی ویژگی های پیچیده ای داشته و کاملاً سه بعدی است. همانطور که قبلاً گفته شد صفحه تقسیم کننده جریان، جریان را به دو قسمت تقسیم می کند. قسمتی از جریان که در کانال پایین دست جریان می یابد به دلیل گسترده شدن جریان و ایجاد گرادیان فشار مخالف، جریان از دیوار مخالف سرریز جدا شده و ناحیه جدایی جریان را به وجود می آورد (شکل ۵-۳). نقطه انتهایی ناحیه جدایی جریان (R) در شکل (۵-۳) مکانی است که سرعت جریان به صفر می رسد.

از آنجایی که جریان در نزدیکی نقطه انتهایی ناحیه جدایی جریان (R) بسیار ناپایدار است، تعیین دقیق این نقطه ممکن نبوده و با ۶ درصد خطا این مقدار تعیین می گردد.

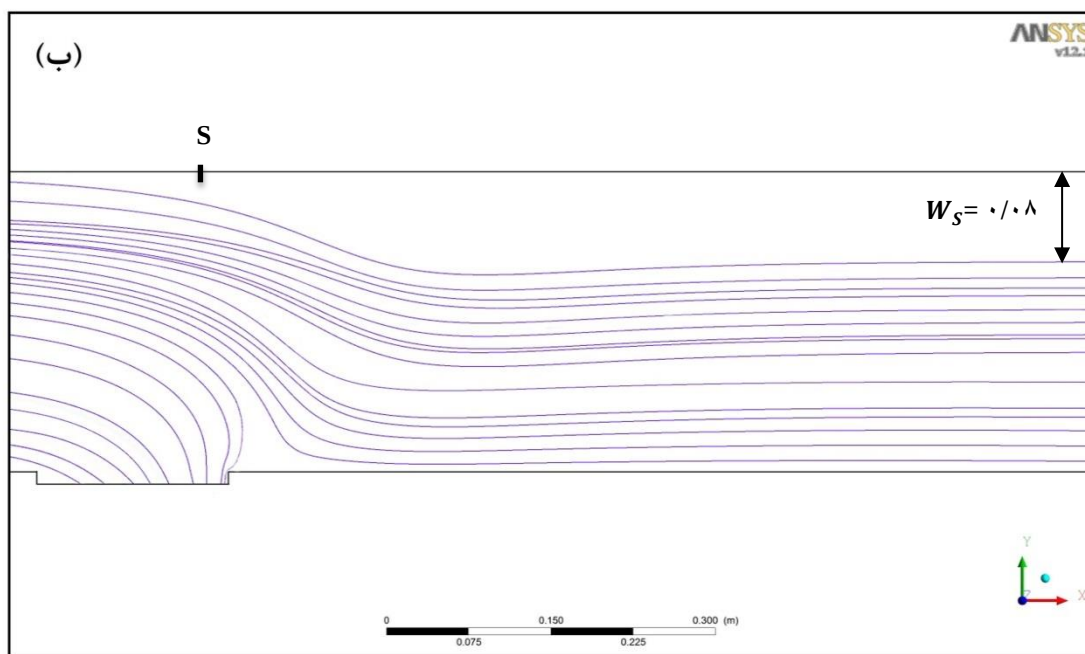
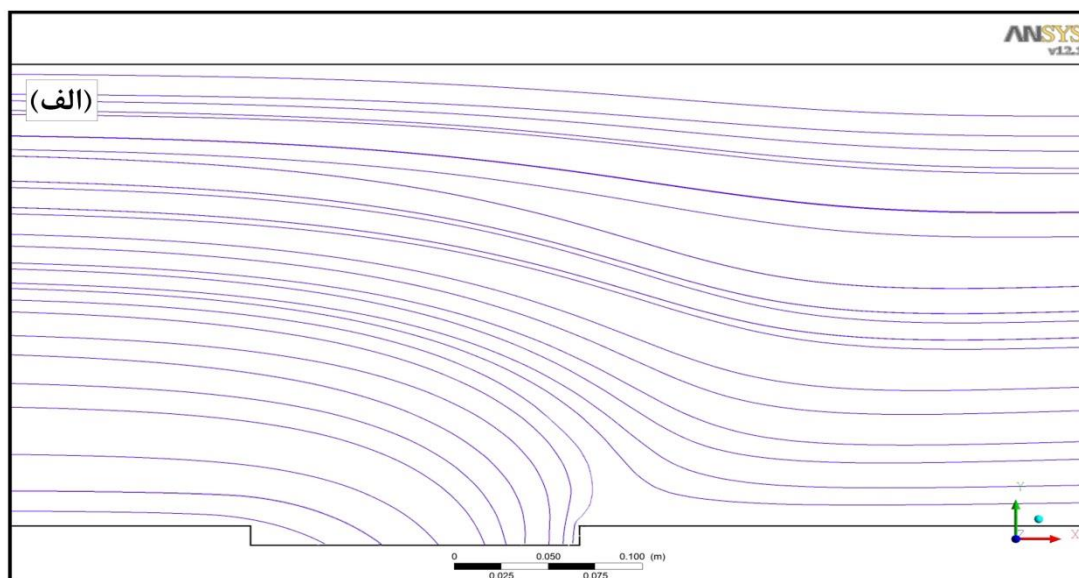
در مدل آزمایشگاهی طول ناحیه جدایی جریان (L_s) در ارتفاع $Z=6$ سانتی متر تقریباً سه برابر عرض کانال و عرض ناحیه جدایی جریان (W_s) تقریباً 0.3 عرض کانال محاسبه شده است. البته مقدار تعیین شده برای عرض ناحیه جدایی جریان، مقدار حداکثر عرض ممکن است (شکل ۵-۳).

شکل های ۵-۱۰ (الف، ب، ج) نشان دهنده خطوط جریان در ارتفاع $Z=6$ سانتی متر برای شبیه سازی با مدل آشفتگی به ترتیب مدل $k-\varepsilon$ ، مدل $k-\varepsilon$ RNG، مدل $k-\omega$ می باشند. همانطور که در شکل مشخص است مدل $k-\varepsilon$ نتوانسته ناحیه جدایی جریان را تعیین کند، حتی نقطه ابتدایی ناحیه جدایی جریان (S) را نیز نتوانسته به خوبی مشخص کند. مدل $k-\varepsilon$ RNG نتوانسته نقطه ابتدایی ناحیه جدایی جریان را به خوبی تعیین کند و فاصله آخرین خطوط جریان از دیوار کانال تقریباً 0.08 سانتی متر می باشد که نزدیک به عرض ناحیه جدایی جریان در مدل آزمایشگاهی می باشد.

اما مدل $k-\omega$ توانست به خوبی ناحیه جدایی جریان را نشان دهد و مقادیر به دست آمده برای طول و عرض ناحیه جدایی جریان با استفاده از این مدل آشفتگی، تطبیق خوبی با جواب های تقریبی به دست آمده از مدل آزمایشگاهی دارد.

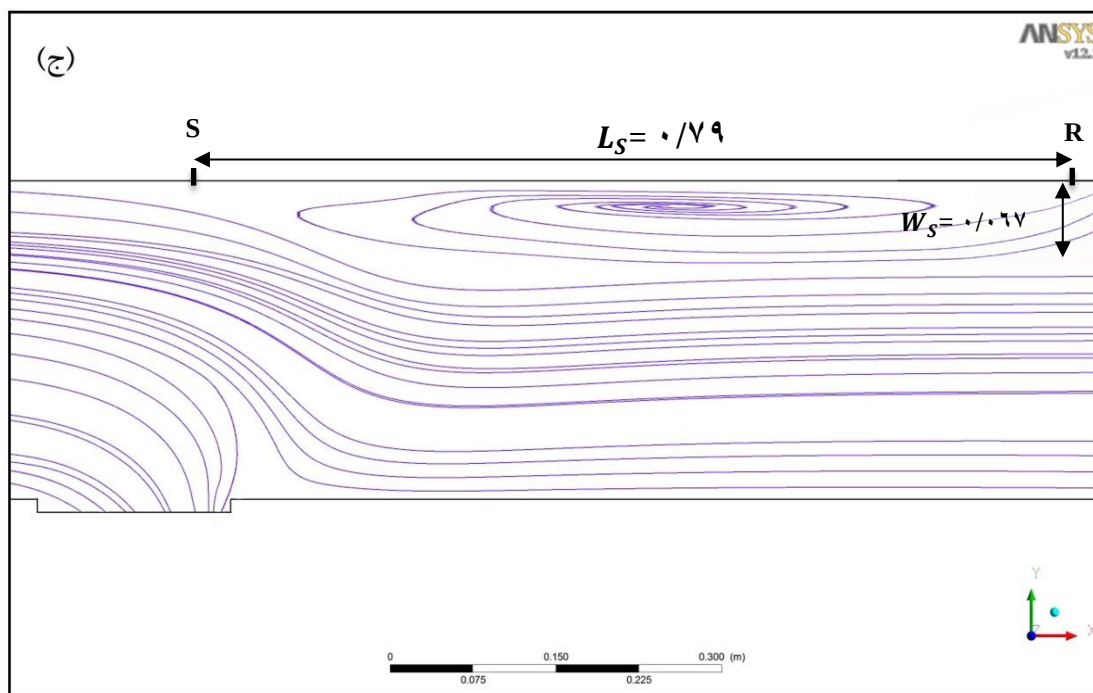
جدول ۵-۴: مقادیر اندازه گیری شده برای ناحیه جدایی جریان

آزمایشگاهی	$k-\omega$	RNG $k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$	
0.1858	0.079	_____	_____	L_s
0.0858	0.067	0.08	_____	W_s



شکل ۵-۱۰ : خطوط جریان در کانال در ارتفاع $Z^* = 0.209$

الف (مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ - ب) مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG



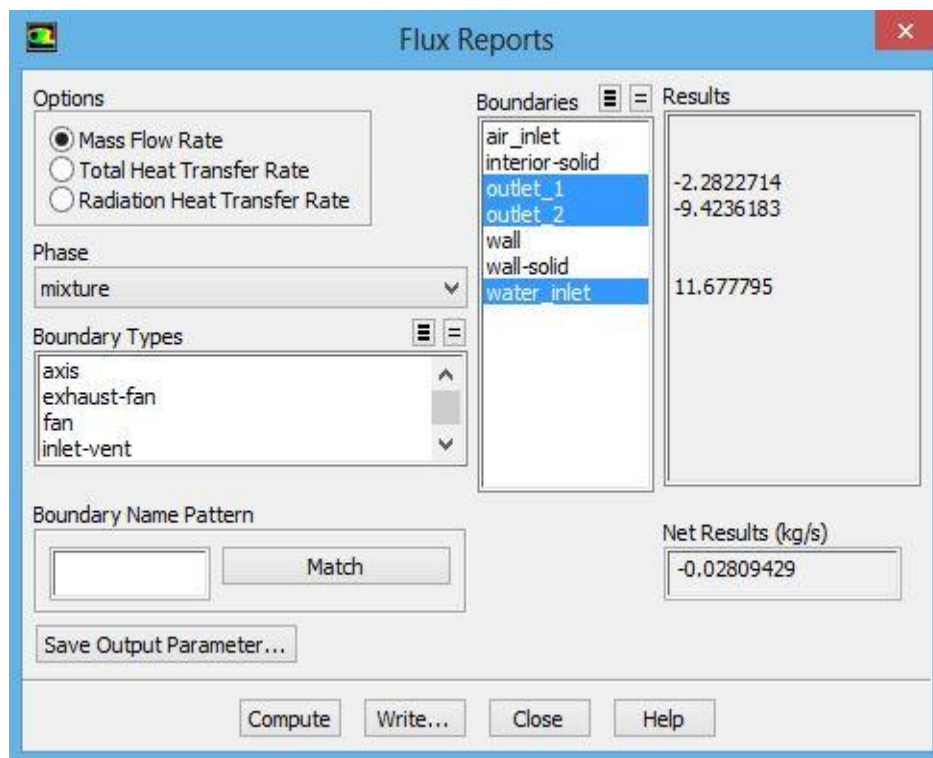
شکل ۵-۱۰: خطوط جریان در کانال در ارتفاع $Z^* = 0.209$

(ج) مدل آشفتگی $k-\omega$

۵-۷ مقایسه بین دبی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

شکل (۵-۱۱) فایل خروجی از نرم افزار انسیس فلوئنت می باشد، که نشان دهنده اختلاف میزان دبی ورودی و خروجی در شبیه سازی سرریز جانبی می باشد. تمام مدل های عددی برای تعیین میزان دبی عملکرد بسیار نزدیک داشته و نتایج یکسانی داشتند. جدول (۵-۱) نشان دهنده مشخصات سرریز برای هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی می باشد و همانطور که مشخص است نرخ دبی هر دو مدل بسیار نزدیک به هم است و تطبیق خوبی بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی وجود دارد.

ولی با توجه به اینکه ابعاد کانال و سرعت ورودی برای هر دو مدل یکسان است، اختلاف بین دبی ورودی و خروجی در مدل عددی نسبت به این اختلاف در مدل آزمایشگاهی ناچیز تر بوده و این حقیقت این موضوع را اذعان می کند که دقت مدل عددی در این زمینه بالاتر بوده است.



شکل ۵-۱۱: میزان دبی ورودی و خروجی در مدل عددی

جدول ۵-۵: مشخصات جریان مدل آزمایشگاهی و جریان مدل عددی

#	توصیفات	واحد	نتایج مدل عددی	نتایج مدل آزمایشگاهی
۱	دبی در پایین دست کانال	m^3/s	۰/۰۰۲۲۸	۰/۰۰۲۴۰
۲	دبی در روی سرریز جانبی	m^3/s	۰/۰۰۹۴۲	۰/۰۰۹۱۷
۳	نرخ دبی		۰/۸۰۵	۰/۷۹۲
۴	عدد فرود		۰/۴۰	۰/۴۰
۵	ارتفاع آب در بالا دست کانال	m	۰/۱۰۱	۰/۱۰۱
۶	عرض کانال	m	۰/۲۸۶	۰/۲۸۶
۷	سرعت جریان در ورودی کانال	m/s	۰/۴۰۵	۰/۴۰۵

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۳) مدل عددی توانست به خوبی الگوی صفحه تقسیم کننده جریان را همانند مدل آزمایشگاهی شبیه سازی کند و نشان دهد که با افزایش ارتفاع از کف کانال، فاصله نقطه سکون از لبه T_p کاهش می یابد.

۴) همانطور که در شکل (۳-۵) مشخص است ناحیه جدایی جریان دارای نقطه شروع (S)، نقطه انتها (R)، طول و عرض می باشد. برای شبیه سازی ناحیه جدایی جریان مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ کاملاً شکست خورد و نتوانست این ناحیه را تشخیص دهد. مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG نتوانست نقطه شروع ناحیه جدایی جریان به درستی، و عرض حداکثر آن را با تقریب خوبی نشان دهد ولی نتوانست نقطه انتهایی ناحیه جدایی جریان را تعیین کند. اما مدل آشفتگی $k-\omega$ نتوانست نقاط ضعف دو مدل آشفتگی دیگر را بپوشاند و ناحیه جدایی جریان را به خوبی شبیه سازی کرده و نتایج قابل قبولی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی ارائه دهد.

۵) در مقایسه بین نرخ دبی در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی وجود دارد و این مقادیر بسیار به هم نزدیک است. اما با توجه به ابعاد و سرعت ورودی یکسان در دو مدل عددی و آزمایشگاهی، میزان اختلاف دبی ورودی و خروجی برای مدل عددی کمتر بوده و این امر نشان دهنده دقت بالاتر مدل عددی در این زمینه می باشد.

۶) به طور کلی شبیه سازی عددی با مدل های آشفتگی دو معادله ای ارائه شده، نتوانست پارامترهای مهم در طراحی سرریز جانبی را تعیین کند و نتایج حاصل تطبیق خوبی با مدل آزمایشگاهی داشت. مدل $k-\omega$ آشفتگی نتوانست نتایج کامل تر و کم نقص تری نسبت به دو مدل آشفتگی دیگر ارائه دهد. اما به دلیل اینکه زمان شبیه سازی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ بسیار طولانی تر از دو مدل آشفتگی دیگر است، پیشنهاد می شود اگر پارامترهای مختلف در طراحی سرریز جانبی به جز ناحیه جدایی جریان ملاک عمل باشد، از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG استفاده شود.

۲-۶ پیشنهادات

(۱) این تحقیق بیشتر تمرکز خود را روی مدل سازی عددی با مدل های آشفتگی $k-\varepsilon$ ، $k-\text{RNG}$ ، $k-\omega$ ، ε قرار داده است. استفاده از مدل های آشفتگی دیگر از قبیل LES و RSM ممکن است نتایج به دست آمده در این تحقیق را بهبود و توسعه دهد.

(۲) مدل عددی را می توان روی شکل های هندسی مختلف از سرریز جانبی در کانال های هندسی مختلف با یک محدوده وسیع از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی از قبیل F_R ، L/B ، S/γ_1 مورد بررسی قرار داد.

(۳) به دست آوردن معادله عمومی دقیق برای تعیین میزان دبی روی سرریز با استفاده از ترکیب های مختلفی از پارامترهای هیدرولیکی مثل F_R ، S/γ_1 ، L/B را می توان مورد بررسی قرار داد.

مراجع

۱. DeMarchi, G. (۱۹۳۴). "Saggio di teoria di funzionamento degli stramazzi laterali", **L'Energia Elettrica**, Milano, Italy, vol. ۱۱, pp. ۸۴۹-۸۶۰ (in Italian).
۲. Tabbara M, Chatila J, (۲۰۰۹) "Computational simulation of flow over side-channel spillways", **Computers and Structures Elsevier**, Vol. ۸۳, pp. ۲۲۱۵-۲۲۲۴.
۳. Mangarulkar K., (۲۰۱۰), Master of Applied Science.thesis, "Experimental and numerical study of the characteristics of side weir flows", Civil Engineering.depart. Concordia University.
۴. ابریشمی ج ، حسینی م ، (۱۳۸۵) "هیدرولیک کانال های باز" ، چاپ چهاردهم ، انتشارات آستان قدس ، مشهد، ص ۳۲۴
۵. طاهری ن، (۱۳۸۳)، پایان نامه ارشد : "تعیین ضریب دبی سرریز جانبی مایل به صورت آزمایشگاهی" ، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۶. Henderson, F.M. (۱۹۶۶). "**Open channel flow**", McMillan & Co., New York.
۷. Frazer, W. (۱۹۵۷). "The Behavior of side weirs in prismatic Rectangular channels", **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, England, vol. ۶, pp. ۳۰۵-۳۲۸.
۸. Subramanya, K. and Awasthy, S. C. (۱۹۷۲). "Spatially varied flow over side weirs", **Journal of Hydraulic Division**, ASCE, vol. ۹۸ (HY۱), pp. ۱-۱۰.
۹. Subramanya k. (۱۹۹۷). "**Flow in open channels**", ۲nd edition, Tata McGraw Hill, New Delhi
۱۰. Hager, W.H. (۱۹۸۷), "Lateral outflow over side weirs", **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, vol. ۱۱۳, pp. ۴۹۱-۵۰۴.
۱۱. Borghei, S.M., Jalili, M.R. and Ghodsian M. (۱۹۹۹). "Discharge coefficient for sharp-crested side weirs in subcritical flow", **Journal of the Hydraulic Division**, ASCE, Vol. ۱۲۵ (۱۰), pp. ۱۰۵۱-۱۰۵۶.

۱۲. Ramamurthy, A.S. and Carballada, L.B. (۱۹۸۰). “Lateral weir flow model”, **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, vol.۱۰۶ (۱), pp.۹-۲۵.
۱۳. Muslu, Y. (۲۰۰۱). “Numerical analysis for lateral weir flow”, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, vol.۱۲۷ (۴), pp. ۲۴۶-۲۵۳.
۱۴. Qu, J.(۲۰۰۵), “ Three dimensional turbulence modeling for free surface flows”, PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
۱۵. Tadayon, R. (۲۰۰۹), “Modelling curvilinear flows in hydraulic structures”, PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
۱۶. R. Munson, F. Young, H. Okiishi, W. Huebsch (۲۰۰۶), “**Fundamentals of Fluid Mechanics**”, Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc, pp ۵۳۵.
۱۷. David C Wilcox, (۲۰۰۶), “**Turbulence Modeling for CFD**”. DCW Industries, Inc.
۱۸. ANSYS FLUENT ۱۲,۱,**Theory Guide**
۱۹. John F. Wendt, “**Computational fluid dynamics an introduction**”, Third Edition, pp ۶-۸.
۲۰. ANSYS FLUENT ۱۲,۱,**User Guide**
۲۱. Michell, J.M. (۱۸۹۰). “On the theory of the free stream lines”, **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, vol.A۱۸۱, pp.۳۸۹-۴۳۱.

Abstract

Side weirs are extensively used in hydraulic engineering, irrigation, and environmental engineering applications which involve flow measurement and regulation. Flows through side weirs are typical examples of spatially varied flow (SVF) with decreasing discharge.

The flow emerging out from the side weir is three-dimensional due to variations in the water surface profile. The present study is confined to the rectangular side weir located in a horizontal rectangular channel having zero sill height. In this research side weirs are simulated using the CFD software Ansys Fluent and turbulence models $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, and $k-\omega$ have been used in the simulation. Volume of fluid multiphase flow simulation model is used to analyze the flow's free surface. The goal of this research is determining flow's various parameters including distribution of velocity vectors, free surface profile, separation zone in the flow, stagnation zone, and separation plane, using the aforementioned turbulence models, and deciding the optimum turbulence model. Results of numerical models were compared with the lab model of Concordia University for validation. All the turbulence models gave acceptable results for most of the side weir's flow parameters. The discrepancy in these model's results were mostly apparent in determining the separation zone of the flow. The $k-\varepsilon$ model could not do this task at all and the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model could only determine the starting point and width of the separation zone of the flow.

But the $k-\omega$ model could simulate the flow's separation zone well enough and in comparison with the lab model gave acceptable results.

Key words:

Side Weir, Turbulence Model, Flow's Free Surface Profile, Ansys Fluent, Volume of Fluid (VOF) Model



Shahrood University of Technology

Department of Civil engineering

Comparison of various turbulence models for numerical simulation of flow in side weir

Hossein Morshedloo

Supervisor :

Dr.Ramin Amini

September ۲۰۱۴