

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

تعیین ضرایب افت زیرگذرها (کالورت) با استفاده از مدل توربولانسی مناسب

دانشجو: سید بهمن جیا

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۲۲۴
تاریخ: ۹۶/۱۵/۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید بهمن جیا با شماره دانشجویی ۹۳۰۵۷۵۴ رشته عمران گرایش آب و سازه های هیدرولیکی تحت عنوان تعیین ضرایب افت زیرگذرها (کالورت) با استفاده از مدل توربولانسی مناسب که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

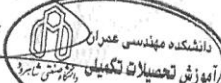
قبول (با امتیاز ۱۶,۴ درجه چهارم) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر رامین امینی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر امیر عباس عابدینی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سعید گلپایان	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء:



تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که در تمامی صحنه های زندگی یار و یاور و

پشتیبان من بوده اند

تشکر و قدردانی

سپاس پروردگار بزرگ را که توفیق انجام این پژوهش را به بند عطا فرمود.

از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر رامین امینی که راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند و همواره از حمایت ها و راهنمایی های ایشان بهره برده ام، کمال سپاس را دارم.

تعهد نامه

اینجناب سید بهمن جیا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تعیین ضرایب افت زیرگذرها (کالورت) با استفاده از مدل توربولانسی مناسب" تحت راهنمایی دکتر رامین امینی به عنوان استاد راهنمای اول متعهد می شوم:

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

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق و نشر

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

چکیده

بررسی ضریب افت انرژی در ورودی و خروجی زیر گذر، به شکل آزمایشگاهی در گذشته انجام گرفته است. محققین عواملی مثل نسبت شکل و نوع تبدیل ورودی و خروجی آبگذر را در تعیین افت انرژی موضعی آبگذر موثر می دانند. در واقع در آزمایشگاه برای تعیین افت انرژی موضعی از فشار سنج در دو طرف کالورت استفاده می گردد. با استفاده از اختلاف فشار این دو فشارسنج و با استفاده از رابطه برنولی می توان مقدار افت انرژی را تعیین نمود و به تبع آن ضریب افت بدست می آید. در این پژوهش هدف آن است که این کار توسط مدل سازی عددی انجام گیرد. مدل سازی عددی برای کالورت با تبدیل های متفاوت با مدل های آشفتگی مختلف صورت می پذیرد و با مقایسه با داده های آزمایشگاهی مناسب ترین مدل آشفتگی تعیین می گردد. با انجام این تحقیق قدرت مدل سازی عددی برای آبگذرها مشخص خواهد شد. واضح است که استفاده از روش های مختلف برای مدل سازی آشفتگی می توانند تاثیر مهمی بر نتایج داشته باشد. در گام اول باید بهترین شکل مدل سازی که مناسب زیرگذرها می باشد تعیین گردد.

برای مدل سازی عددی از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. با توجه به درک اهمیت بسیار زیاد جریان سیال، در این تحقیق سعی شده تا حدودی با معادلات حاکم و روش های استفاده شده برای شبیه سازی جریانات آشفته آشنا شویم.

مدل سازی های انجام گرفته برای کالورت های باکس مربعی و دایره ای در ۴ حالت سطح مقطع صورت می گیرد و در هر حالت ضریب افت برای ورودی و خروجی زیر گذر با آشفتگی های متفاوت محاسبه می شود. پس از انجام مدل سازی و استفاده از انواع مدل های آشفتگی در ورودی و خروجی زیرگذر برای تبدیل های مختلف با استفاده از نرم افزار فلوئنت و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، مدل $k-\epsilon$ Realizable به عنوان مناسب ترین مدل آشفتگی پیشنهاد می گردد.

کلمات کلیدی: کالورت، آبگذر، افت انرژی، ضریب افت، دینامیک سیالات، فلوئنت، مدل آشفتگی

فهرست

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱. مقدمه	۲
۲-۱. بیان مسئله	۳
۳-۱. روش تحقیق	۳
۴-۱. اهداف پایان نامه	۴
۴-۱. ساختار پایان نامه	۴
فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی وسوابق گذشته	۵
۱-۲. مقدمه	۶
۲-۲. مروری بر تحقیقات پیشین	۶
۳-۲. انواع زیرگذر به لحاظ شکل مقطع	۸
۴-۲. جنس زیرگذرها	۹
۵-۲. اهمیت هندسه ورودی در ظرفیت زیرگذر	۱۰
۶-۲. بناهای ورودی و خروجی زیرگذر(تبدیل ها)	۱۱
۷-۲. ابعاد زیرگذر	۱۲
۸-۲. شیب کالورت	۱۲
۹-۲. هیدرولیک زیرگذرها	۱۲

- ۱۷.....۱۰-۲. وضعیت جریان در زیر گذر
- ۱۸.....۱-۱۰-۲. جریان با کنترل ورودی
- ۲۰.....۲-۱۰-۲. جریان با کنترل خروجی
- ۲۱.....۱۱-۲. جریان های آشفته
- ۲۳.....۱-۱۱-۲. فرضیه بوزینسک
- ۲۴.....۱-۱-۱۱-۲. مدل های صفر معادله ای
- ۲۵.....۲-۱-۱۱-۲. مدل های یک معادله ای
- ۲۵.....۳-۱-۱۱-۲. مدل های دو معادله ای
- ۲۷.....فصل سوم: معادلات حاکم
- ۲۸.....۱-۳. مقدمه
- ۲۸.....۲-۳. معادلات اساسی جریان سیالات
- ۲۹.....۱-۲-۳. بقای جرم (معادله پیوستگی)
- ۳۰.....۲-۲-۳. بقای مومنتوم (معادله مومنتوم)
- ۳۱.....۳-۳. گسسته سازی
- ۳۱.....۱-۳-۳. اصول پایه
- ۳۴.....۲-۳-۳. گسسته سازی مکان
- ۳۷.....۳-۳-۳. گسسته سازی معادله

- ۳۸ ۱-۳-۳-۳. روش حجم محدود
- ۴۲ ۴-۳-۳. گسسته سازی زمان
- ۴۳ ۴-۳. آشنایی با نرم افزار فلونت
- ۴۵ ۵-۳. مدل های آشفتگی
- ۴۸ ۱-۵-۳. مدل های K-ε استاندارد، RNG و محسوس
- ۴۹ ۱-۱-۵-۳. مدل K-ε استاندارد
- ۴۹ ۱-۱-۱-۵-۳. معادلات انتقال برای مدل استاندارد K-ε
- ۵۰ ۲-۱-۱-۵-۳. مدل سازی لزجت آشفتگی
- ۵۰ ۲-۱-۵-۳. RNG K-ε
- ۵۱ ۱-۲-۱-۵-۳. معادلات انتقال برای مدل RNG K-ε
- ۵۱ ۲-۲-۱-۵-۳. مدل سازی لزجت موثر
- ۵۲ ۳-۱-۵-۳. مدل K-ε محسوس
- ۵۳ ۱-۳-۱-۵-۳. معادلات انتقال برای مدل K-ε محسوس
- ۵۴ ۶-۳. رفتار جریان در نزدیک دیوار برای جریان های آشفته محدود به دیوارها
- ۵۶ ۱-۶-۳. توابع دیوار در مقایسه با مدل نزدیک دیوار
- ۵۷ ۲-۶-۳. توابع دیوار
- ۵۸ ۱-۲-۶-۳. توابع دیوار استاندارد

۵۸.....	۲-۲-۶-۳. ممنوم
۵۹.....	۳-۲-۶-۳. آشفنگی
۶۱.....	۴-۲-۶-۳. توابع دیوار نامتعادل
۶۳.....	۵-۲-۶-۳. توابع دیوار استاندارد در برابر توابع دیوار نامتعادل
۶۳.....	۶-۲-۶-۳. محدودیت های روش تابع دیوار
۶۵.....	فصل چهارم: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی ضریب افت جریان در ورودی زیرگذرها
۶۶.....	۱-۴. مقدمه
۶۶.....	۲-۴. نتایج آزمایشگاهی
۶۹.....	۳-۴. شرایط ورودی مسئله
۶۹.....	۱-۳-۴. ابعاد زیرگذر
۶۹.....	۲-۳-۴. خصوصیات سیال
۶۹.....	۳-۳-۴. سرعت ورودی
۷۰.....	۴-۳-۴. شرایط مرزی دیوار
۷۰.....	۵-۳-۴. شتاب جاذبه
۷۰.....	۶-۳-۴. فشار خروجی
۷۰.....	۷-۳-۴. معیار همگرایی
۷۰.....	۸-۳-۴. شدت آشفنگی

۷۱	۴-۴. مدل سازی هندسه
۷۲	۴-۴. تولید شبکه مناسب
۷۲	۴-۴.۱. نوع شبکه بندی
۷۲	۴-۴.۲. اندازه شبکه بندی
۷۳	۴-۵. مدل سازی زیرگذر و کانال
۷۳	۴-۶. ضریب افت
۷۴	۴-۷. مقایسه نتایج عددی انواع مدل های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی
۱۰۵	۴-۸. بررسی انواع الگوریتم های حل توام سرعت و فشار
۱۰۵	۴-۹. بررسی فشار و سرعت ابتدا و انتهای تبدیل
۱۱۰	۴-۱۰. تغییرات شدت آشفتگی در ابتدا و انتهای تبدیل
۱۱۳	۴-۱۱. تغییرات لزجت گردابی در ابتدا و انتهای تبدیل
۱۱۷	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۸	۵-۱. نتیجه گیری
۱۱۹	۵-۲. پیشنهادات
۱۲۰	مراجع و منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ شکل مقطع زیر گذر ۹
- شکل ۲-۲-انواع تبدیل در ورودی و خروجی کالورت ۱۱
- شکل ۳-۲-مشخصات جریان حالت اول در کالورت ۱۲
- شکل ۴-۲-مشخصات جریان حالت دوم در کالورت ۱۳
- شکل ۵-۲-مشخصات جریان حالت سوم در کالورت ۱۳
- شکل ۶-۲-مشخصات جریان حالت چهارم در کالورت ۱۴
- شکل ۷-۲-مشخصات جریان حالت پنجم در کالورت ۱۴
- شکل ۸-۲-مشخصات جریان حالت ششم در کالورت ۱۵
- شکل ۹-۲-مشخصات جریان حالت هفتم در کالورت ۱۵
- شکل ۱۰-۲-مشخصات جریان حالت هشتم در کالورت ۱۶
- شکل ۱۱-۲-حالات جریان در کالورت ۱۷
- شکل ۱۲-۲-جریان با کنترل ورودی در کالورت ۲۰
- شکل ۱۳-۲-جریان با کنترل خروجی در کالورت ۲۱
- شکل ۱-۳-اصل بقای جرم ۲۹
- شکل ۲-۳-گسسته سازی یک مسئله جریان ۳۳
- شکل ۳-۳-شبکه بندی با سازمان ۳۵

- شکل ۳-۴- شبکه بندی بدون سازمان ۳۵
- شکل ۳-۵- شبکه با سازمان بلوکی ۳۶
- شکل ۳-۶- مقایسه روش های گسسته سازی ۳۸
- شکل ۳-۷- سلول حجم محدود برای محاسبات سه بعدی ۳۹
- شکل ۳-۸- قسمت های ناحیه نزدیک دیوار ۵۶
- شکل ۳-۹- مدل سازی های جریان در نزدیک دیوار در فلوئنت ۵۷
- شکل ۴-۱- ضریب افت های موضعی ورودی و خروجی در تبدیل ها ۶۸
- شکل ۴-۲- زیرگذر نوع ۵، $D=10\text{CM}$ ۷۱
- شکل ۴-۳- شبکه بندی مقطع ورودی کانال ۷۲
- شکل ۴-۴- نمودار درصد خطا در ورودی زیرگذرهای باکس ۱۰۳
- شکل ۴-۵- نمودار درصد خطا در ورودی زیرگذرهای لوله ای ۱۰۴
- شکل ۴-۶- مقدار فشار در ابتدا، وسط و انتهای تبدیلی ورودی ۱۰۷
- شکل ۴-۷- مقدار سرعت در ابتدا، وسط، انتهای تبدیلی ورودی و در زیرگذر بعد از تبدیلی ورودی ... ۱۱۰
- شکل ۴-۸- درصد شدت آشفتگی در ابتدا، وسط و انتهای تبدیلی ورودی ۱۱۲
- شکل ۴-۹- لزجت گردابی در ابتدا، وسط و انتهای تبدیلی ورودی ۱۱۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- ضریب مانینگ ۱۰
- جدول ۱-۳- روش های گسسته سازی مکان و مقدمات شبکه ۳۶
- جدول ۱-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با ورودی تیز گوشه (۱) ۷۵
- جدول ۲-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با ورودی تیز گوشه (۱) ۷۶
- جدول ۳-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل دیواره عمود (۲) ۷۷
- جدول ۴-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل دیواره عمود (۲) ۷۹
- جدول ۵-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل گوه ای (۳) ۸۰
- جدول ۶-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل دیواره گوه ای (۳) ۸۲
- جدول ۷-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل گرد گوشه (۴) ۸۳
- جدول ۸-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل گرد گوشه (۴) ۸۴
- جدول ۹-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل مایل (۵) ۸۵
- جدول ۱۰-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل مایل (۵) ۸۷
- جدول ۱۱-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل دیواره مایل (۶) ۸۸
- جدول ۱۲-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل دیواره مایل (۶) ۸۹
- جدول ۱۳-۴- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۷) ۹۱
- جدول ۱۴-۴- درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۷) ۹۲

- جدول ۴-۱۵- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۸) ۹۳
- جدول ۴-۱۶- درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۸) ۹۵
- جدول ۴-۱۷- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیوار مایل (۹) ۹۶
- جدول ۴-۱۸- درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیوار مایل (۹) ۹۷
- جدول ۴-۱۹- ضریب افت زیرگذر مستطیلی با تبدیل دیوار عمود (۱۰) ۹۸
- جدول ۴-۲۰- درصد خطا زیرگذر مستطیلی با تبدیل دیوار عمود (۱۰) ۹۹
- جدول ۴-۲۱- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۱۱) ۱۰۱
- جدول ۴-۲۲- درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۱۱) ۱۰۲

فهرست علائم

h_f	افت انرژی
k	ضریب افت انرژی
R	شعاع هیدرولیکی
f_c	شتاب کوریولیس
g	شتاب ثقل
h	عمق جریان
n	ضریب زبری مانینگ
P	فشار
P_a	فشار اتمسفر
t	زمان
w, v, u	مولفه های سرعت در راستای محورهای کارتیزین
w', v', u'	نوسانات مولفه های سرعت در راستای محورهای کارتیزین
$\bar{w}, \bar{v}, \bar{u}$	مقادیر متوسط زمانی مولفه های سرعت در راستای محورهای کارتیزین
x, y, z	محورهای مختصات کارتیزین
C	ضریب شزی، غلظت متوسط رسوب در عمق
\vec{V}	بردار سرعت
ψ	لزجت سینماتیک سیال
ρ	چگالی
ζ	تراز سطح آب
∇	گرادیان
Δt	گام زمانی

Δx گام مکانی

Q دبی

b عرض کانال

Γ ضریب پخش

F_r عدد فرود

فصل اول: مقدمه

۱-۱. مقدمه

زیرگذرها^۱ (کالورت ها) از انواع سازه های انتقال آب هستند که به عنوان نمونه در زیر جاده ها، راه آهن و زیر یک کانال دیگر استفاده می گردند. چنانچه در مسیر آبرو یا خط القعری به جهت ایجاد راه یا راه آهن از خاکریز استفاده شود، برای انتقال آب از یک سوی خاکریز به سمت دیگر آن از زیرگذر استفاده می شود که در پایین ترین نقطه خط القعر ساخته می گردد. این نوع سازه ها اگرچه از نظر اجرایی ساده هستند اما طرح هیدرولیکی آن ها پیچیده و تابعی از عوامل مختلف است که به سادگی قابل تقسیم به جریان های تحت فشار یا آزاد نمی باشد بلکه در برخی موارد ترکیبی از این دو حالت را دارا می باشد [۱].

بنابر خصوصیات این نوع سازه ها شرایط مختلفی از جریان، در آن ها ایجاد می شود که در این شرایط تحت تاثیر حالت های مختلفی از عمق جریان در بالادست یا پایین دست، شیب کف، زبری جداره و شکل هندسی دهانه ورودی به وجود می آید، لذا ضریب افت انرژی تغییر می نماید. زیرگذرها باید به گونه ای ساخته شوند که بتوانند برای جلوگیری از انقباض جریان کانال یک رودخانه و بهترین شکل عبور آب از مجرا، هماهنگی لازم را ایجاد کنند. در یک طراحی بهینه، هزینه ساخت و ریسک های اقتصادی می بایست در نظر گرفته شود.

برای جلوگیری از تشکیل گرداب که باعث فرسایش و خوردگی می شود و همچنین برای کاهش افت انرژی از تبدیل استفاده می شود. جریان در ورودی و خروجی تبدیل دارای افت موضعی و در طول زیرگذر دارای افت اصطکاکی است. برای شکل های مختلف ورودی و خروجی زیرگذر و مصالح تشکیل دهنده و همچنین جریان هایی که درون زیرگذر (آشفنگی) تشکیل می شود، ضرایب افت مختلفی به صورت تجربی در نظر گرفته شده است.

با توجه به اهمیت این ضرایب افت، هدف از تحقیق حاضر تعیین ضرایب افت زیرگذرها در مدل های توربولانسی مختلف به روش عددی می باشد، با توجه به ضرایب افت بدست آمده در روش عددی و

^۱ Culvert

مقایسه آن با نتایج تجربی حاصل از کارهای دیگر محققان، بهترین مدل توربولانسی در جریان زیرگذرها مشخص می گردد. برای شبیه سازی موضوع از نرم افزار مدل سازی فلوئنت استفاده می شود.

زیرگذرها را از بعضی جهات می توان با پل ها مقایسه نمود. زیرگذرها و پل ها از این جهت که هر دو برای حمل آب از قسمت زیرین بنا های مهندسی استفاده می شوند مشابه یکدیگرند. طبق تعریف، ابنیه فنی با دهانه بزرگتر از ۶ متر را پل و ابنیه فنی با دهانه ۶ متر به پایین را آبرو می نامند. وجه تمایز پل ها و آبروها عمدتاً در خاکریزی روی اکثر آبروهاست که خاکریزی روی پل ها موجب هزینه اضافی می شود و ضرورتی ندارد [۲]. از طراحی پل با عرشه مستغرق حتی المقدور اجتناب می شود ولی همانطور که اشاره شد طراحی در شرایط مناسب می تواند با ورودی مستغرق انجام گیرد. در انتخاب پل یا آبرو بایستی به هزینه ساخت و نگهداری، پذیرش خطر خرابی و خسارت به املاک مجاور، ایمنی، ترافیک و نکات زیست محیطی و معماری توجه شود [۲].

۲-۱. بیان مسئله

جریان آب در ورودی و خروجی آبگذرها با افت انرژی همراه است که با کارهای آزمایشگاهی انجام شده برای زیرگذرهایی با اشکال مختلف در تبدیل ورودی و خروجی، ضریب افت انرژی متناسب تعیین شده است. در این پژوهش قرار است با مدل سازی عددی به تعیین ضرایب افت موضعی در تبدیل ورودی و خروجی زیرگذرهای آب با شرایط آشفتگی متفاوت و مقایسه با داده های آزمایشی پرداخته شود.

۳-۱ روش تحقیق

حل معادلات با روش حجم محدود انجام می گیرد و مدل سازی عددی در نرم افزار فلوئنت برای زیرگذرهای جاده ای انجام می شود. برای انجام مدل سازی از هندسه معمول در سازه های انتقال آب و ایجاد ابعاد و شرایط اختیاری با توجه به بی بعد بودن ضرایب استفاده می شود و در پایان پروژه داده های بدست آمده با داده های تجربی مقایسه می گردد و نتایج حاصل شده ارائه خواهد شد.

۴-۱. اهداف پایان نامه

اهداف این پژوهش شامل: مدل سازی سه بعدی و تحلیل عددی زیر گذر، مقایسه الگوریتم های حل عددی، بررسی تاثیر ضریب افت نسبت به بعد و تعیین بهترین مدل آشفستگی جریان در مدل سازی عددی زیرگذرهای آب (کالورت) می باشد.

۴-۱. ساختار پایان نامه

در این پایان نامه، به بیان کارهای انجام شده جریان کالورت توسط محققین پیشین و همچنین بیان کلیاتی در مورد کالورت و شرایط هیدرولیکی جریان عبوری درون زیرگذر در فصل دوم پرداخته می شود. در فصل سوم، معادلات اساسی حاکم بر جریان سیالات و نرم افزار معرفی می گردد. این معادلات شامل معادله بقای جرم، معادلات پیوستگی، معادلات آشفستگی و انواع مدل های آشفستگی می شوند. در فصل چهارم مدل سازی عددی انجام شده و نتایج مدل عددی با نتایج واقعی مقایسه می گردد. در واقع در این فصل سعی بر این بوده است که استقلال ضریب افت از بعد بررسی و همچنین مناسب ترین مدل آشفستگی تعیین گردد. در نهایت فصل ششم، نتیجه گیری و پیشنهادات ادامه کار را در بر دارد.

فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی

وسوابق گذشته

۲-۱. مقدمه

با توجه به کاربرد تبدیل ها در انواع سازه ای های هیدرولیکی اعم از کانال ها، زیرگذرها، سرریزها، لوله ها و غیره شناخت هرچه بیشتر آن می تواند به صرفه جویی در وقت و هزینه و همچنین اعمال بهینه ترین حالت جریان کمک کند. می توان با انتخاب مناسب ترین نوع تبدیل با توجه به شرایط هیدرولیکی و نوع سازه هیدرولیکی به این مهم دست یافت.

۲-۲. مروری بر تحقیقات پیشین

آیدل چیک^۱ در سال ۱۹۸۶ تونل با دهانه مدور با تغییرات خاص در یک مخزن با سرعت جریان ناچیز را در نظر گرفت. ضریب افت انرژی موضعی بدست آمده در این حالت برابر $k=0.5 \exp(-15r/d)$ که r و d به ترتیب شعاع مجرا و قطر می باشد و همچنین آیدل چیک ضریب افت موضعی را برای مجرا با دهانه چهار گوش در یک مخزن بررسی کرد که بستگی به محل و ضخامت دیوارهای کناری دارد. ضریب افت انرژی برای مجرای که کف آن در راستای کف مخزن است معادل 0.63 می باشد [۳].

گردال و هاگر^۲ در سال ۱۹۶۲ چندین ضریب افت انرژی برای مجرای در حالت انقباض و انبساط دسته بندی کردند. براساس نتایج $k=0.5 (1-A_2/A_1)$ را برای مجرای انقباضی وقتی برابر 90° درجه و A_1 و A_2 به ترتیب مساحت خیس شده برای بالا دست مجرای انقباضی و انبساطی می باشد، بدست آمد [۴].

اپلت^۳ در سال ۱۹۶۸ در دانشگاه کوئیزلند روش ساده ای را برای مشخصات کالورت MEL (کالورت با حداقل افت انرژی) پیشنهاد کرد. این روش برای طراحی مقدماتی بوده و برای محاسبات کامل باید از معادلات برگشت آب در محاسبه پروفیل سطح آزاد استفاده کرد. این روش بر این فرض استوار است که جریان در طول سازه (ورودی، گلو، خروجی) به صورت بحرانی است [۵].

^۱ Idelchik

^۲ Gardel and Hager

^۳ apelt

فورث هی^۱ در سال ۱۹۶۹ طی تحقیقاتی نشان داد که در دبی های یکسان برای کالورت های خیلی بلند، طراحی به روش حداقل افت انرژی (MEL) بسیار اقتصادی تر است و برای ملاحظات بیشتر، ضریب اطمینان بزرگتر، مدل ها و مشاهدات اولیه قاطعانه نشان داد که، کالورت های MEL دبی های با اختلاف زیادی از دبی طراحی را نیز با ضریب اطمینان خوبی عبور می دهند که برای کالورت های استاندارد چنین نیست [۶].

بلايسدل^۲ و همکاران در سال ۱۹۶۹ با استفاده از امکانات آزمایشگاهی به طراحی تبدیل ناگهانی از لوله به کانال مستطیلی پرداختند آن ها برای استخراج روابط جاکم از معادله تراژکتوری جت آب استفاده کردند و در نهایت با استفاده از داده های آزمایشگاهی، روابطی را برای طول و عرض وسایر پارامترهای هیدرولیکی کانال در برخورد با جت حاصله ارائه کردند [۷].

مایکلز^۳ در سال ۱۹۸۰ به بررسی آزمایشگاهی بهترین تبدیل در خروجی کالورت های لوله ای پرداخت و در نهایت با در نظر گرفتن افت انرژی، آبشستگی و توزیع سرعت در خروجی کالورت، ابعاد بهترین تبدیل را با توجه به قطر کالورت ارائه کرد [۸].

احمدی و ابریشمی در سال ۱۳۸۷ به بررسی عددی تاثیر سرعت جریان بر ضرایب افت انرژی در تبدیل های عریض شونده توسط نرم افزار فلونت پرداختند و نتایج بدست آمده نشان داد که ضرایب افت انرژی بر خلاف نظر پیشینیان، علاوه بر هندسه تبدیل به سرعت جریان نیز وابسته می باشد و این وابستگی با تدریجی شدن تبدیل کاهش می یابد اما از بین نمی رود. همچنین طول گردابه در تبدیل ناگهانی مستقل از سرعت بوده و تابعی از هندسه تبدیل می باشد [۹].

^۱ Hee. M

^۲ Blaisdell

^۳ Michels

ون نام^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به ارزیابی عددی ضریب افت انرژی در تبدیل باکس از کانال رو باز به زیرگذر توسط نرم افزار FLOW3D پرداختند. بررسی پروفیل های هد انرژی در طول کانال و دبی های مختلف حاکی از آن است که افت انرژی که به علت افت اصطکاکی بوده ناچیز بوده ولی در طول تبدیل به دلیل تغییر مقطع، افت بیشتر بوده، که با افزایش دبی افت هم بیشتر می شود. در ضمن افت اصطکاکی برای دبی های کم نسبت به دبی های بالا، بیشتر می باشد [۱۰].

۲-۳. انواع زیرگذر به لحاظ شکل مقطع

در بررسی چگونگی جریان و ارتفاع سطح آب در کانال و یا به عبارت دیگر برای آنالیز هیدرولیکی زیرگذر، شکل و ابعاد مقطع از عوامل تعیین کننده به شمار می رود. انتخاب شکل زیرگذر به عواملی نظیر دبی، ارتفاع خاکریز روی زیرگذر، توپوگرافی منطقه و فرسایش رسوب، ذرات معلق در آب و غیره بستگی دارد.

از جمله شکل های متداول برای مقطع زیرگذرها می توان به کالورت های دایروی، قوسی، نعل اسبی، دایروی موجدار و جعبه ای اشاره نمود (شکل ۲-۱).

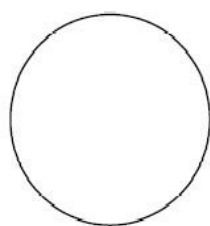
در تحقیق حاضر شکل مقطع از نوع دایروی و جعبه ای می باشد. این زیرگذرها بیشترین موارد استفاده را دارا می باشند. این امر ناشی از عوامل متعددی است که در زیر به برخی از این عوامل اشاره شده است:

۱- ارزان هستند.

۲- در حالت بتن مسلح، کارگذاری میلگردها آسان می باشد.

۳- محاسبات ساده تری دارند.

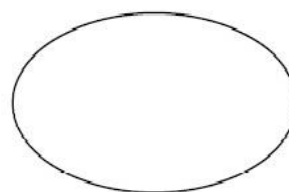
^۱ Van Nam. N



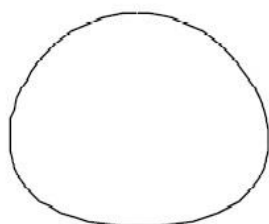
Circular



Box



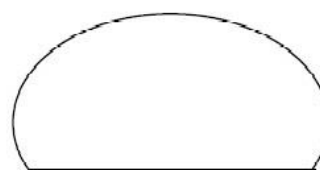
Elliptic



Pipe Arch



Metal Box



Arch

شکل ۱-۲ شکل مقطع زیر گذر

۴-۲. جنس زیرگذرها

زیرگذرها به صورت بتنی و لوله‌های فلزی موجدار استفاده می‌شوند. به طور کلی استفاده از مواد مختلف برای زیرگذرها به شرط آنکه اهداف مورد نظر را تامین کنند مجاز می‌باشد، در انتخاب جنس زیرگذر عوامل متعددی موثر می‌باشند که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- وزن خاک روی کالورت و بار طراحی

۲- عمر مفید مورد نظر برای زیرگذر

۳- خاصیت اسیدی یا قلیایی خاک

۴- قطر و یا به عبارتی ابعاد زیرگذر

۵- ضریب مانینگ مواد مصرفی

۶- اقتصادی بودن طرح

با در نظر گرفتن ملاحظات فوق می توان جنس زیرگذر مناسب را انتخاب کرد، شایان ذکر است که ضریب زبری مانینگ که در روابط هیدرولیکی حاکم بر جریان مایع مورد استفاده قرار می گیرد تابعی از جنس زیرگذر و تا حدودی ابعاد آن می باشد. بادهین در سال ۱۹۷۶ جدول ۱-۲ را برای مقادیر ضریب مانینگ کالورت های بتنی ارائه کرد.

جدول ۱-۲- ضریب مانینگ

ضریب مانینگ n	مشخصات بتن
۰,۰۱۰	خیلی صاف
۰,۰۱۱-۰,۰۱۵	صاف
۰,۰۱۲-۰,۰۱۵	بتن کارگاهی معمولی
۰,۰۱۵-۰,۰۲۰	بتن چکشی

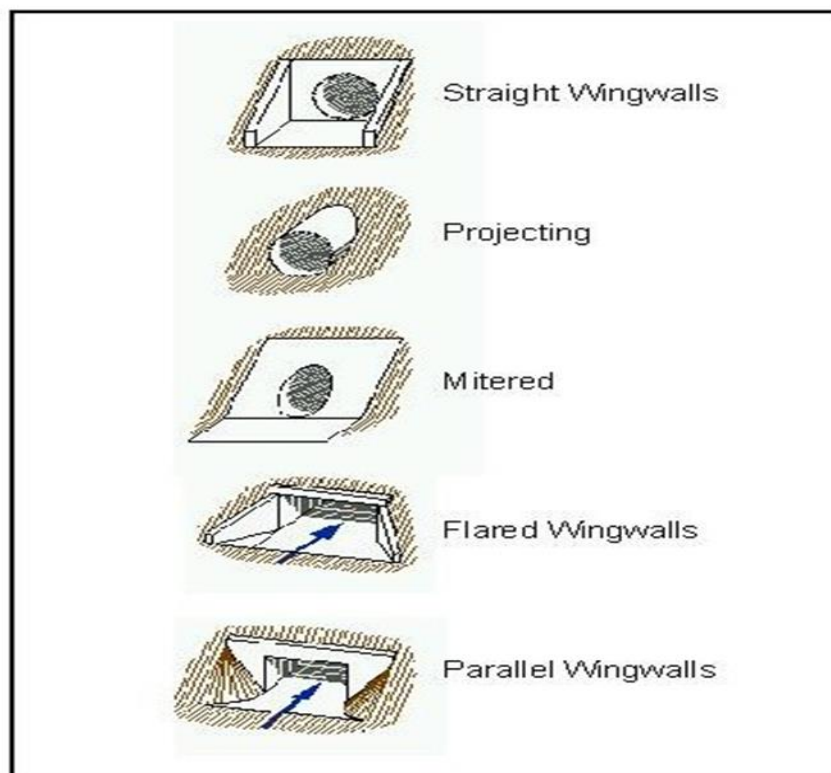
۲-۵. اهمیت هندسه ورودی در ظرفیت زیرگذر

مطالعات و آزمایشات صورت گرفته تاکنون، تاثیر شکل و هندسه ی لبه های آبرو را در قسمت ورودی کالورت، بر ظرفیت انتقال آب زیرگذر تایید نموده است. در حالت جریان با کنترل ورودی هر دو عامل شکل و هندسه لبه آبرو دارای اهمیت بسیاری می باشند، ولی در حالت جریان با کنترل خروجی، شکل دهانه ورودی تا حدودی بر ظرفیت زیرگذر تاثیر دارد، ولی اثر هندسه لبه آبرو نسبت به حالت جریان با کنترل ورودی تاثیر کمتری دارد.

در این حالت (کنترل خروجی) وجود پخی ها در لبه دهانه ورودی باعث می شود تا در محاسبه عمق آب در آبروهای فلزی موجدار $k=0.21$ و در آبروهای بتنی $k=0.20$ در نظر گرفته شود [۱۱].

۲-۶. بناهای ورودی و خروجی زیرگذر (تبدیل ها)^۱

جهت جلوگیری از فرسایش سواحل (خاک) ورودی و خروجی کالورت ها و بهبود ویژگی های هیدرولیکی آن ها از جمله کاهش افت انرژی، از بناهایی با اشکال مختلف در ورودی و خروجی استفاده می شود. این بناها عمدتاً شامل دیوارهای انتهایی و جانبی می باشند (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲-انواع تبدیل در ورودی و خروجی کالورت

^۱ Transitions

۲-۷. ابعاد زیرگذر

اندازه انتخاب شده برای کالورت بایستی توانایی عبور دبی طرح را دارا باشد. در انتخاب ابعاد کالورت عوامل متعددی از جمله محدودیت های مکانی، امکان پاکسازی داخل آبرو، ملاحظات هیدرولیکی و کاهش هزینه و غیره موثر می باشد

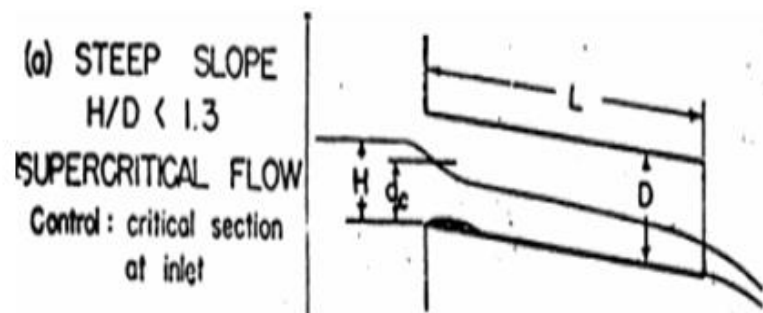
۲-۸. شیب کالورت

شیب کالورت معمولاً از شرایط طبیعی زمین تبعیت می کند اما در بعضی موارد سرعت زیاد جریان در زیرگذر باعث فرسایش می شود و لازم است تغییراتی در شیب داده شود.

۲-۹. هیدرولیک زیرگذرها

با توجه به اینکه تحقیق در مورد کالورت ها به ۸ حالت کلی تقسیم می شود در ابتدا به شرح مختصری در مورد حالت های مختلف آن ها پرداخته و آن ها را توضیح می دهیم [۱].

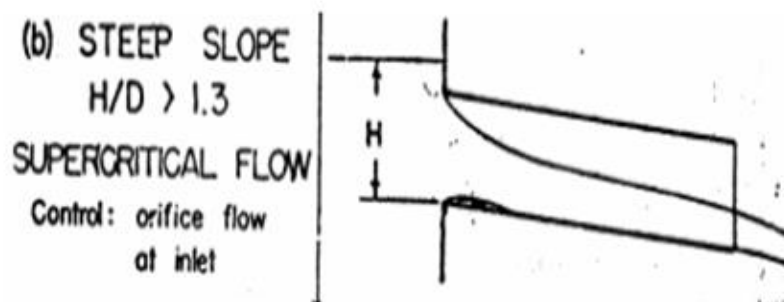
مشخصات جریان در حالت اول : شیب کانال در این حالت تند و جریان فوق بحرانی و کنترل جریان بحرانی در مقطع ورودی می باشد، همچنین بسته به اینکه شکل ورودی تیز گوشه یا گرد گوشه باشد جریان اثرات مختلفی از خود نشان می دهد ، ورودی تیز گوشه افت بیشتری نسبت به ورودی گرد گوشه دارد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- مشخصات جریان حالت اول در کالورت

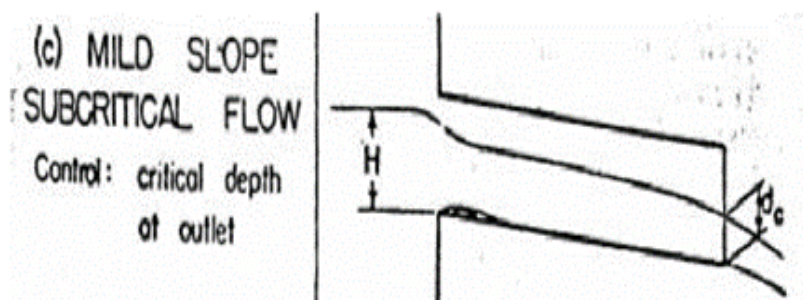
مشخصات جریان در حالت دوم : شیب کانال در این حالت تند ، جریان فوق بحرانی و کنترل جریان روزنه یا اریفیس در مقطع ورودی می باشد ، ضریب $C=0.5$ برای ورودی تیز گوشه و $C=0.61$ برای ورودی گرد گوشه خواهد بود. به علت تیز گوشه بودن جدار فوقانی جریان جدا می شود و بر نمی گردد ، در این حالت جریان ورودی به منزله روزنه تلقی می شود (شکل ۲-۴).

C ضریب دبی می باشد.



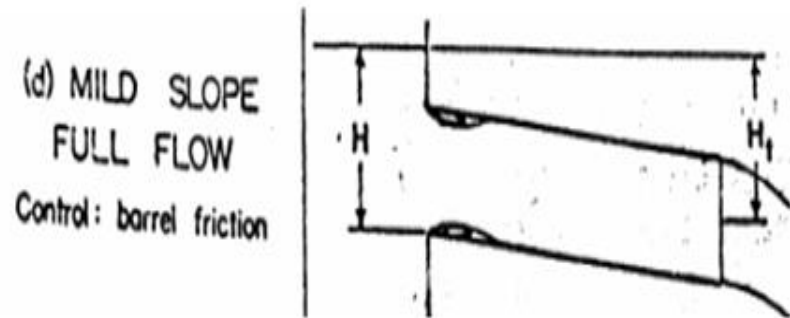
شکل ۲-۴- مشخصات جریان حالت دوم در کالورت

مشخصات جریان در حالت سوم: شیب کانال در اینجا ملایم، جریان زیر بحرانی و کنترل جریان بحرانی در مقطع خروجی می باشد، $C=0.5$ برای ورودی تیز گوشه و $C=0.8$ برای ورودی گرد گوشه خواهد بود (شکل ۲-۵).



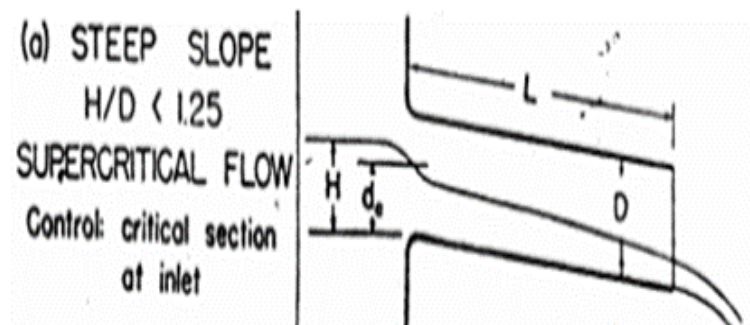
شکل ۲-۵- مشخصات جریان حالت سوم در کالورت

مشخصات جریان در حالت چهارم: شیب کانال در این حالت ملایم، جریان به صورت کاملا پر و کنترل جریان به صورت اصطکاکی در مجرا می باشد، همچنین وقتی مقدار ارتفاع آب H در این حالت افزایش یابد جریان با سرعت بیشتری به داخل مجرا هدایت می شود (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶- مشخصات جریان حالت چهارم در کالورت

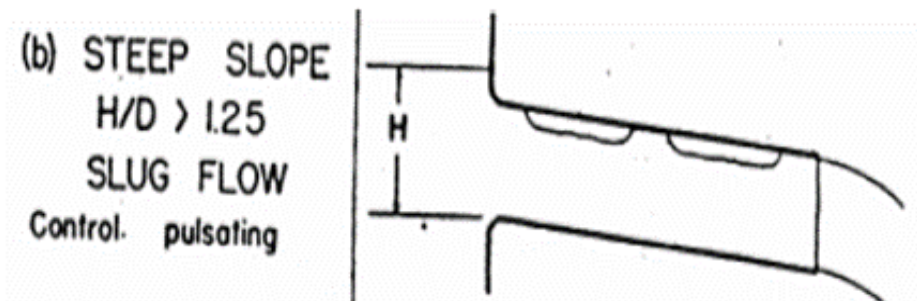
مشخصات جریان در حالت پنجم: شیب کانال در این حالت تند، جریان فوق بحرانی و کنترل جریان بحرانی در مقطع ورودی می باشد (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷- مشخصات جریان حالت پنجم در کالورت

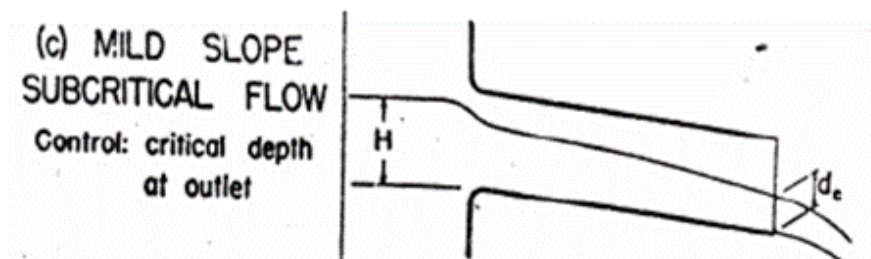
مشخصات جریان در حالت ششم: شیب کانال در این حالت تند، جریان گردابی و کنترل جریان به صورت نوسانی است. طراحی در چنین حالتی کار بسیار مشکل و پیچیده ای است، در این حالت جریان ناماندگار بوده و به علت مکیدن هوا به داخل مجرای آبگذر در سیستم لرزش ایجاد می شود. همچنین استفاده از کالورت به عنوان سیستم انتقال توصیه نمی شود و اگر مجبور باشیم تنها برای عبور سیلاب

می توان از آن استفاده کرد که این مسئله غالباً در سدهای بزرگ وجود دارد این حالت شبیه حالت دوم می باشد (شکل ۲-۸).



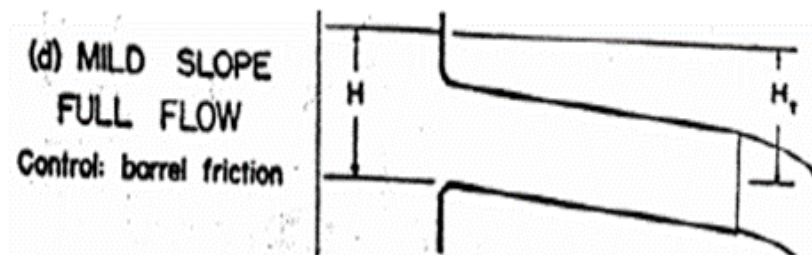
شکل ۲-۸- مشخصات جریان حالت ششم در کالورت

مشخصات جریان در حالت هفتم: شیب جریان در این حالت ملایم، و کنترل جریان در مقطع خروجی وجود دارد این حالت شبیه به حالت سوم می باشد و تنها انرژی تلف شده در آن کمتر می باشد (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹- مشخصات جریان حالت هفتم در کالورت

مشخصات جریان در حالت هشتم: شیب جریان در این حالت ملایم، جریان در کانال به صورت کاملا پر و کنترل جریان به صورت اصطکاکی در مجرای می باشد، این حالت شبیه حالت چهارم بوده و تنها در آن انرژی تلف شده کمتر می باشد (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰- مشخصات جریان حالت هشتم در کالورت

عوامل بسیاری از جمله ویسکوزیته، تلاطم جریان و شرایط ورودی بر روی ضریب تخلیه آبگذرها موثر هستند. بادهین^۱ پس از انجام تحقیقات و آزمایشهای گسترده، جریان آبگذرها را به شش دسته مختلف بر اساس ارتفاع نسبی آب سرآب و پایاب تقسیم کرده است (شکل ۲-۱۱).

TYPE	EXAMPLE	TYPE	EXAMPLE
1 CRITICAL DEPTH AT INLET $\frac{h_1 - z}{D} < 1.5$ $h_4/h_c < 1.0$ $S_0 > S_c$		4 SUBMERGED OUTLET $\frac{h_1 - z}{D} > 1.0$ $h_4/D > 1.0$	
2 CRITICAL DEPTH AT OUTLET $\frac{h_1 - z}{D} < 1.5$ $h_4/h_c < 1.0$ $S_0 < S_c$		5 RAPID FLOW AT INLET $\frac{h_1 - z}{D} > 1.5$ $h_4/D \approx 1.0$	
3 TRANQUIL FLOW THROUGHOUT $\frac{h_1 - z}{D} < 1.5$ $h_4/D \approx 1.0$ $h_4/h_c > 1.0$		6 FULL FLOW FREE OUTFALL $\frac{h_1 - z}{D} > 1.5$ $h_4/D \approx 1.0$	

شکل ۲-۱۱- حالات جریان در کالورت

۲-۱۰. وضعیت جریان در زیر گذر

بسته به دبی جریان، طول و شیب کف زیر گذر و همچنین عمق آب در بالادست و پایین دست، وضعیت جریان در زیرگذر ممکن است به گونه های مختلف ظاهر شود. برای اقتصادی کردن طرح اصولاً سعی

^۱ bodhaine

می شود که از تمام مقطع مجرا استفاده شود و سطح آب در بالادست مجرا بالاتر از سقف مجرا قرار بگیرد از اینرو اصولاً ممکن است وضعیت جریان به صورت زیر باشد:

الف) شرایط سطح آب در پایین دست جریان، شیب کف مجرا و عمق آب در بالادست به نحوی است که سطح آب در مجرا به سقف نمی رسد و عمق بحرانی در مقطع ورودی تشکیل می گردد. این وضعیت را کنترل ورودی می نامند. در این حالت اصطلاحاً می گویند پایاب بر سراب بی اثر است.

ب) تمامی شرایط به نحوی است که زیر گذر به صورت پر عمل نماید و پایاب بر سراب تاثیر می گذارد این وضعیت را کنترل خروجی می گویند.

۲-۱۰-۱. جریان با کنترل ورودی

کنترل ورودی جریان به طور کلی در کالورت ها با شیب تند و صاف اتفاق می افتد. کالورت به صورت نیمه پر در شرایط فوق بحرانی جریان می یابد، همانطور که در شکل ۲-۱۲-الف و ۲-۱۲-ج نشان داده شده است. ولی اگر انتهای پایین دست مستغرق باشد، یک پرش هیدرولیکی می تواند رخ دهد، که بعد از آن کالورت مانند شکل ۲-۱۲-ب به صورت پر، جریان خواهد یافت.

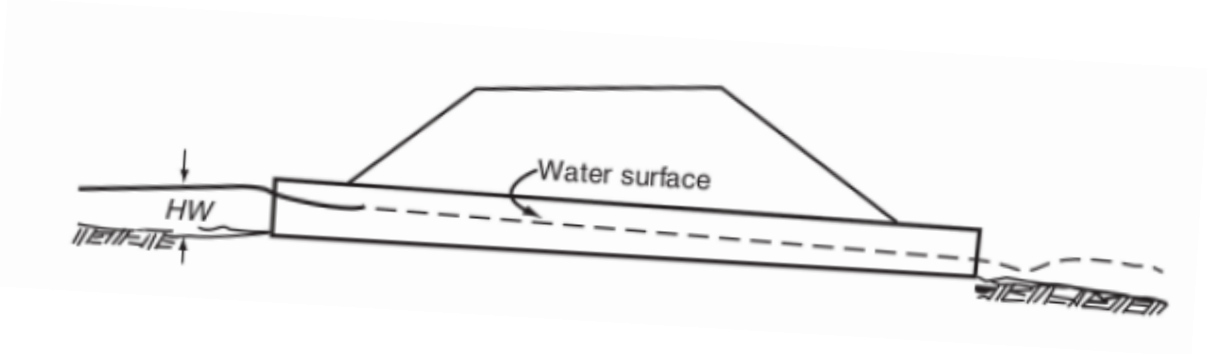
رفتار هیدرولیکی ورودی اگر ورودی غیر مستغرق باشد مشابه سرریز است. اگر ورودی مستغرق باشد ورودی به صورت مشابه با روزنه عمل می کند.

بر اساس FHWA (نورمن^۱ و همکاران ۱۹۸۵) ورودی غیر مستغرق است اگر

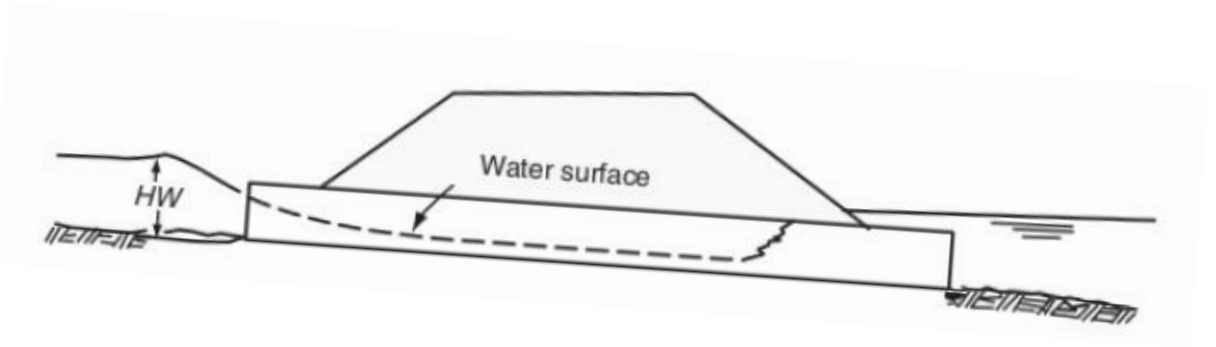
$$\frac{Q}{Ad^{0.5}g^{0.5}} \leq 0.62$$

که Q دبی، A مساحت سطح مقطع کالورت، d ارتفاع ورودی کالورت و g شتاب گرانش است.

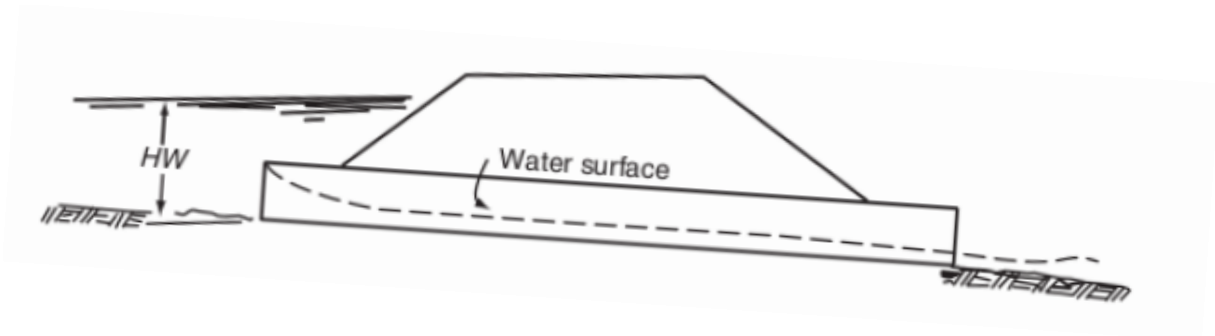
^۱ Norman



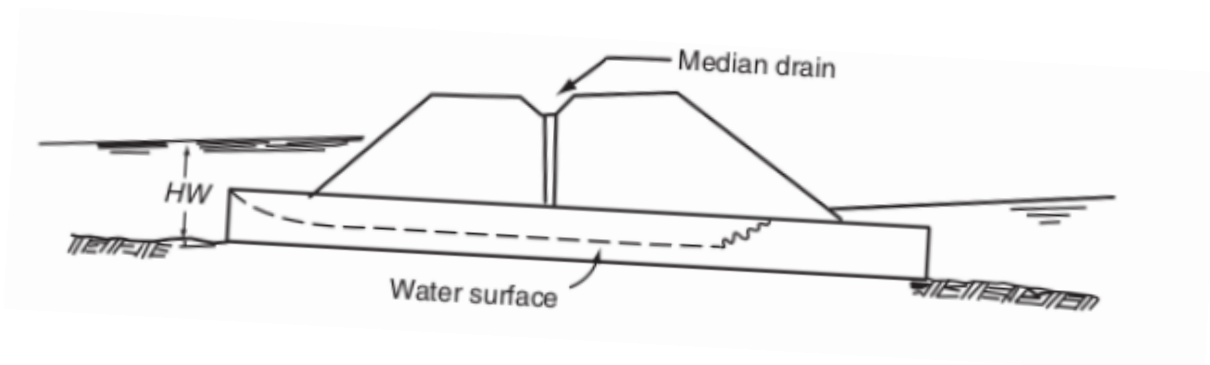
شکل ۱۲-۲-الف خروجی نامستغرق



شکل ۱۲-۲-ب خروجی مستغرق ورودی نامستغرق



شکل ۱۲-۲-ج ورودی مستغرق

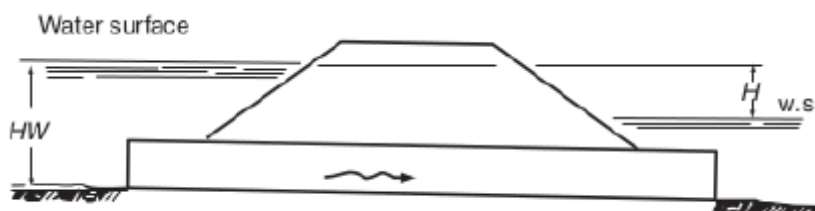


شکل ۲-۱۲-د خروجی مستغرق

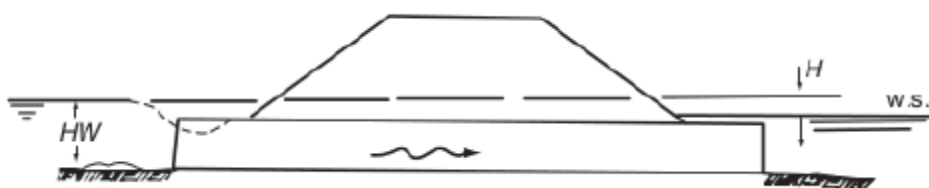
شکل ۲-۱۲- جریان با کنترل ورودی در کالورت

۲-۱۰-۲. جریان با کنترل خروجی

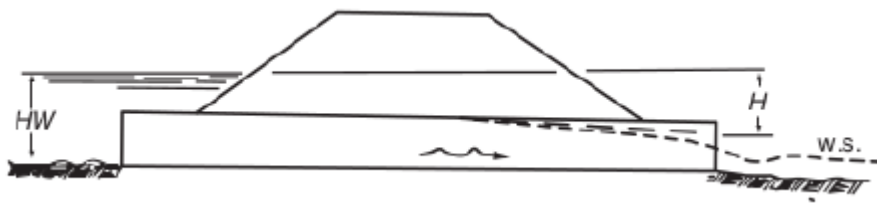
یک کالورت ممکن به صورت پر یا نیمه پر تحت شرایط کنترل خروجی جریان را از خود عبور دهد. هنگام جریان نیمه پر، جریان کالورت زیر بحرانی است. گونه های مختلف جریان کنترل خروجی در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده اند.



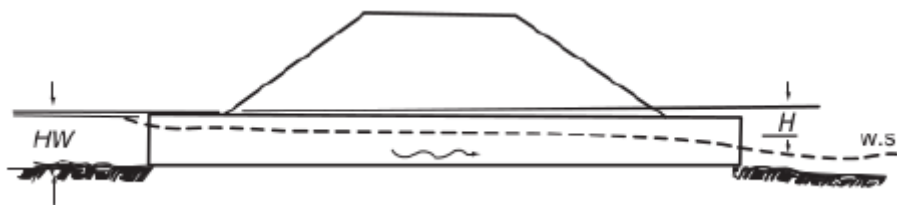
شکل ۲-۱۳-الف ورودی و خروجی پر



شکل ۲-۱۳-ب خروجی مستغرق



شکل ۲-۱۳-ج ورودی مستغرق و خروجی به صورت بحرانی



شکل ۲-۱۳-د ورودی نامستغرق و خروجی به صورت بحرانی

شکل ۲-۱۳-۱ جریان با کنترل خروجی در کالورت

۱۱-۲. جریان های آشفته

اکثر جریان های موجود در طبیعت به صورت آشفته می باشند. در اعداد رینولدز پایین جریان آرام بوده ولی در اعداد رینولدز بالا جریان آشفته می شود ، بطوریکه یک حالت تصادفی از حرکت در جاییکه سرعت و فشار بطور پیوسته درون بخش های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می کنند ، گسترش می یابد. این جریان ها بوسیله خصوصیتی که در ادامه ارائه شده اند، شناسائی می گردند:

- جریان های آشفته بشدت غیر یکنواخت هستند. در این جریان ها اگر تابع سرعت در برابر زمان ترسیم شود، بیشتر شبیه به یک تابع تصادفی خواهد بود.
- این جریان ها معمولاً سه بعدی هستند. پارامتر سرعت میانگین گاهی اوقات ممکن است تنها تابع دو بعد باشد، اما در هر لحظه ممکن است سه بعدی شود.

○ در این نوع جریان ها گرداب های کوچک بسیار زیادی وجود دارند. شکل کشیده^۱ یا عدم تقارن گرداب ها یکی از خصوصیات اصلی این جریان ها است؛ که این امر با افزایش شدت آشفتگی افزایش می یابد.

○ آشفتگی، شدت جریان های چرخشی در جریان را افزایش می دهد که این عمل می تواند باعث اختلاط شود. فرآیند چرخش در سیالاتی رخ می دهد که حداقل، میزان یکی از مشخصه های پایستار آن ها متغیر باشد. عمل اختلاط بوسیله فرآیند پخش انجام می شود، به این نوع جریان ها غالباً جریان های پخشی^۲ نیز می گویند.

در اینجا ذکر این نکته نیز لازم است که آشفتگی جریان باعث می شود جریان هایی با مقادیر متفاوت اندازه حرکت با یکدیگر برخورد کنند. گرداب های سرعت بر اثر ویسکوزیته سیال کاهش می یابند و این امر باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می شود. به بیان دیگر می توان گفت که اختلاط یک پدیده مستهلک کننده انرژی است. انرژی تلف شده نیز طی فرآیندی یکطرفه به انرژی داخلی (حرارتی) سیال تبدیل می شود.

تمام مشخصاتی که به آن ها اشاره شد برای بررسی یک جریان آشفته مهم هستند. تأثیراتی که توسط آشفتگی ایجاد می شود بسته به نوع کاربری ممکن است ظاهر نشود و به همین دلیل باید این جریان ها را با توجه به نوع و کاربری آن مورد بررسی قرار داد. برای بررسی جریان های آشفته روش های مختلفی وجود دارد که در ادامه به تعدادی از آن ها اشاره خواهد شد [۱۲].

مدل های آشفتگی، ویسکوزیته گردابه ای (ν_t) و یا تنش رینولدز (U_{ij}) را تعیین می کنند و فرضیات زیادی برای همه آن ها حاکم است که عبارتند از:

^۱ Stretch

^۲ Diffusive

- معادلات ناویر استوکس میانگین گیری شده زمانی^۱ می تواند بیانگر حرکت متوسط جریان آشفته باشد.
- پخش آشفتگی متناسب با گرادیان ویژگیهای آشفتگی است.
- گردابه ها می توانند ایزوتروپیک و یا غیرایزوتروپیک باشند.
- همه مقادیر انتقال آشفته توابع موضعی از جریان هستند.
- در مدل های آشفته باید همسازی^۲ وجود داشته باشد.
- این مدل ها می توانند یک مقیاسی و یا چند مقیاسی باشند.
- همه مدل ها در نهایت به کالیبراسیون بصورت تجربی نیاز دارند.

۲-۱۱-۱. فرضیه بوزینسک

فرضیه بوزینسک بیان می کند که می توان تنش های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل ها ارتباط داد. بسیاری از مدل های آشفتگی بر پایه این فرضیه استوار هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل ها، آشفتگی افزایش می یابد [۱۳].

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (1-2)$$

ارتباط تنش های رینولدز با نرخ میانگین تغییر شکل ها:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2-2)$$

μ_t ویسکوزیته گردابه ای یا مولکولی نامیده شده و واحد آن Pa.s است.

^۱ RANS

^۲ Consistency

مدل های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنش های آشفتگی با سرعت های متوسط گیری شده یا گرادیان آن ها به مدل های زیر تقسیم می شوند:

○ مدل های صفر معادله ای

○ مدل های تک معادله ای

○ مدل های دو معادله ای

انواع دیگر مدل های آشفتگی:

○ مدل های دارای معادله تنش

○ مدل های شبیه سازی گردابه ای بزرگ^۱

۲-۱۱-۱-۱. مدل های صفر معادله ای

در این مدل ها هیچگونه معادله دیفرانسیلی برای کمیت های آشفتگی ارائه نمی شود. این مدل ها نسبتاً ساده بوده و داده های تجربی و آزمایشگاهی در آن ها نقش اساسی دارد و تنش های آشفتگی در هر جهت متناسب با گرادیان سرعت می باشد [۱۳]. نمونه ای از این مدل ها عبارتند از

○ مدل لزجت گردابه ای ثابت^۲

○ مدل طول اختلاط پранتل^۳

○ مدل لایه برش آزاد پранتل^۴

^۱ large eddy simulation models

^۲ constant eddy viscosity model

^۳ Prandtl mixing-length model

^۴ Prandtl's free shear layer model

۲-۱۱-۱-۲. مدل های یک معادله ای

این مدل ها بر خلاف مدل های صفر معادله ای، از یک معادله برای انتقال کمیت آشفتگی استفاده می کنند. این معادله ارتباط بین مقیاس سرعت نوسانی و کمیت آشفتگی می باشد که جذر انرژی جنبشی آشفته \sqrt{k} به عنوان مقیاس سرعت در حرکت آشفته مدنظر می باشد و مقدار آن توسط معادله انتقال محاسبه می گردد.

۲-۱۱-۱-۳. مدل های دو معادله ای

مدل های دو معادله ای معمول ترین مدل ها هستند که قادرند نتایج بهتری در جریان هایی که مدل طول اختلاط نمی تواند به صورت تجربی در یک روش ساده مورد استفاده قرار بگیرد، ارائه دهند. بطور مثال جریان های چرخشی از این نمونه اند. تقسیم بندی این مدل ها بر اساس محاسبه تنش رینولدز و یا ویسکوزیته گردابه ای بصورت زیر است:

○ ویسکوزیته گردابه ای

○ جبری

○ تنش رینولدز غیرخطی

این مدل ها دو معادله دیفرانسیل را حل می کنند، به معادله k که از قبل بود معادله ϵ هم اضافه می شود. معادله انرژی جنبشی k بیان کننده مقیاس سرعت است، بدین صورت که اگر قرار باشد سرعت های نوسانی مورد بررسی قرار گیرند، می توان جذر انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی در واحد جرم را بعنوان مقیاس در نظر گرفت، معادله نرخ میرایی انرژی جنبشی، ϵ ، نیز مقیاس طول است. در حقیقت مقیاس طول، اندازه گردابه های بزرگ دارای انرژی جنبشی را می دهد که باعث انتقال آشفتگی در توده سیال می شود [۱۳].

فصل سوم: معادلات حاکم

۳-۱. مقدمه

استفاده از CFD برای پیش بینی جریان های داخلی و خارجی در دهه های گذشته کاربرد وسیعی پیدا کرده است. کتاب روآک^۱، در سال ۱۹۷۲ کمک شایانی به کاربرد و پیشرفت CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) نمود.

کاربرد CFD در زمینه های آیرودینامیک (شاخه ای از علوم در مورد محاسبه نیروها در اثر حرکت سطوح و اشکال مختلف در هوا یا سایر گازها)، جریان ها و انتقال آب سطحی و مدل سازی اشتعال، انتقال گرما، هواشناسی و غیره می باشد.

۳-۲. معادلات اساسی جریان سیالات

در این بخش معادلات حاکم بر دینامیک سیالات توضیح داده می شود. شبیه سازی یک جریان سیال در رایانه بصورت ترم های ساده تر می باشد که باعث حل معادلات اساسی شناخته شده سرعت و فشار جریان سیال می شود. این معادلات بطور مستقل یک و نیم قرن قبل توسط مهندس فرانسوی ناویر^۲ و ریاضی دان ایرلندی استوکس^۳ کشف شد.

معادلات، بطور مستقیم از قانون حرکت نیوتن بدست آمدند، که به معادلات ناویر- استوکس مشهور هستند. شکل بقاء معادلات ناویر - استوکس می تواند بطور مستقیم با در نظر گرفتن یک کمیت فرضی و خصوصیات جرم و مومنتوم ماده بدست می آید.

^۱ Roache

^۲ Cloude Navier

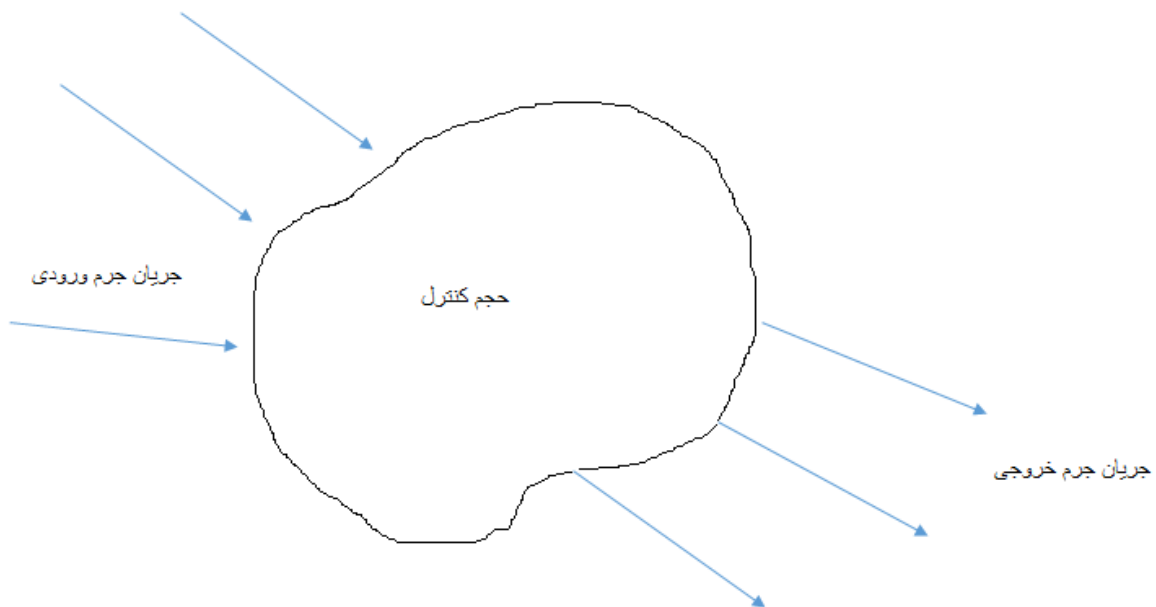
^۳ George Stokes

۳-۲-۱. بقای جرم^۱ (معادله پیوستگی)^۲

تغییر جرم در یک حجم کنترل برابر است با کل جرمی که از طریق سطوح آن وارد می شود منهای کل جرمی که از طریق سطوح حجم خارج می شود. این اصل می تواند برای حجم های ثابت شده بکار برده شود، که مشهور به حجم های کنترل (یا سطوح کنترل) است، مانند آنچه که در شکل ۳-۱ می بینید.

این معادله در حالت مختصر بصورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (۳-۱)$$



شکل ۳-۱- اصل بقای جرم

این معادله به صورت زیر قابل باز نویسی می باشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (۳-۲)$$

^۱ Conservation of Mass

^۲ Equation of Continuity

که $x_i (i=1,2,3)$ یا x, y, z محورهای کارتیزین $u_i (i=1,2,3)$ و مولفه های کارتیزین بردار سرعت u, v, w ، ρ جرم مخصوص سیال و t زمان می باشد. با فرض یک سیال تراکم ناپذیر با یک چگالی ثابت ρ می توان بقای جرم را بوسیله معادله پیوستگی در دستگاه محورهای کارتیزین سه بعدی بصورت زیر بیان کرد:

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

۳-۲-۲. بقای مومنتوم^۱ (معادله مومنتوم)^۲

بر طبق قانون دوم حرکت می توان نوشت:

نرخ تغییر مومنتوم یک جسم برابر است با، برآیند نیروهایی که روی جسم عمل می کند و در راستای نیرو اتفاق می افتد.

نیروهایی که ممکن است روی سیال عمل کنند، برای مثال عبارتند از نیروهای سطحی مانند فشار، نیروهای برشی و عمودی و غیره یا نیروهای حجمی مانند نیروهای گرانشی یا کریولیس هستند. شکل برداری بقای مومنتوم بصورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} \vec{v}) = \text{div}T + \rho b \quad (4-3)$$

که در آن b نیروهای حجمی خارجی^۳ و T تانسور تنش^۴ برای سیالات نیوتنی^۵ می باشد، که نرخ مولکولی انتقال مومنتوم است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$T = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \text{div} \vec{v}\right)I + 2\mu D \quad (5-3)$$

^۱ Conservation of Momentum

^۲ Momentum Equation

^۳ External Body Force

^۴ Stress Tensor

^۵ Newtonian Fluids

در این رابطه، μ ویسکوزیته دینامیکی، λ تانسور واحد، p فشار و D نرخ تانسور کرنش می باشد.

$$D = \frac{1}{2} [\text{grad} \vec{v} + (\text{grad} \vec{v})^T] \quad (6-3)$$

با در نظر گرفتن یک سیال تراکم ناپذیر نیوتنی، معادله (۳-۲) را در شکل کارتزین و با استفاده از معادله پیوستگی می توان بصورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 x_j} + \rho g_i \quad (7-3)$$

که g_i مولفه شتاب گرانشی g در راستای مختصات کارتزین x_i می باشد. معمولاً فرض می شود که گرانش در راستای منفی Z عمل می کند و ترم گرانش را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\rho g_i = -\text{grad}(\rho g(z - z_b)) \quad (8-3)$$

که z_b تراز مرجع است، برای حل عددی با تعریف فشار به عنوان \tilde{p} موثرتر خواهد بود:

$$\tilde{p} = p + \rho g(z - z_b) \quad (9-3)$$

و این رابطه به جای فشار استفاده می شود.

۳-۳. گسسته سازی

۳-۳-۱. اصول پایه

همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، فرمول بندی ریاضی جریان سیال بر اساس بقای جرم و ممنتوم می باشد. معادلات پایه در مدل سازی عددی مسائل هیدرولیکی، معادلات دیفرانسیلی جزئی مرتبه دوم می باشند، که شامل بیان عملگرهای دیفرانسیلی جزئی تغییر متغیرهای وابسته در محدوده می باشند. راه حل های عددی فقط در نقاط گسسته سازی شده جواب می دهند، که نقاط شبکه در زمان های ویژه نامیده می شود. گسسته سازی عبارت است از تغییر دادن یک مسئله پیوسته به یک مسئله گسسته. عملگرهای دیفرانسیلی جزئی که در معادلات حاکم ظاهر می شوند، بطور مثال بصورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$$

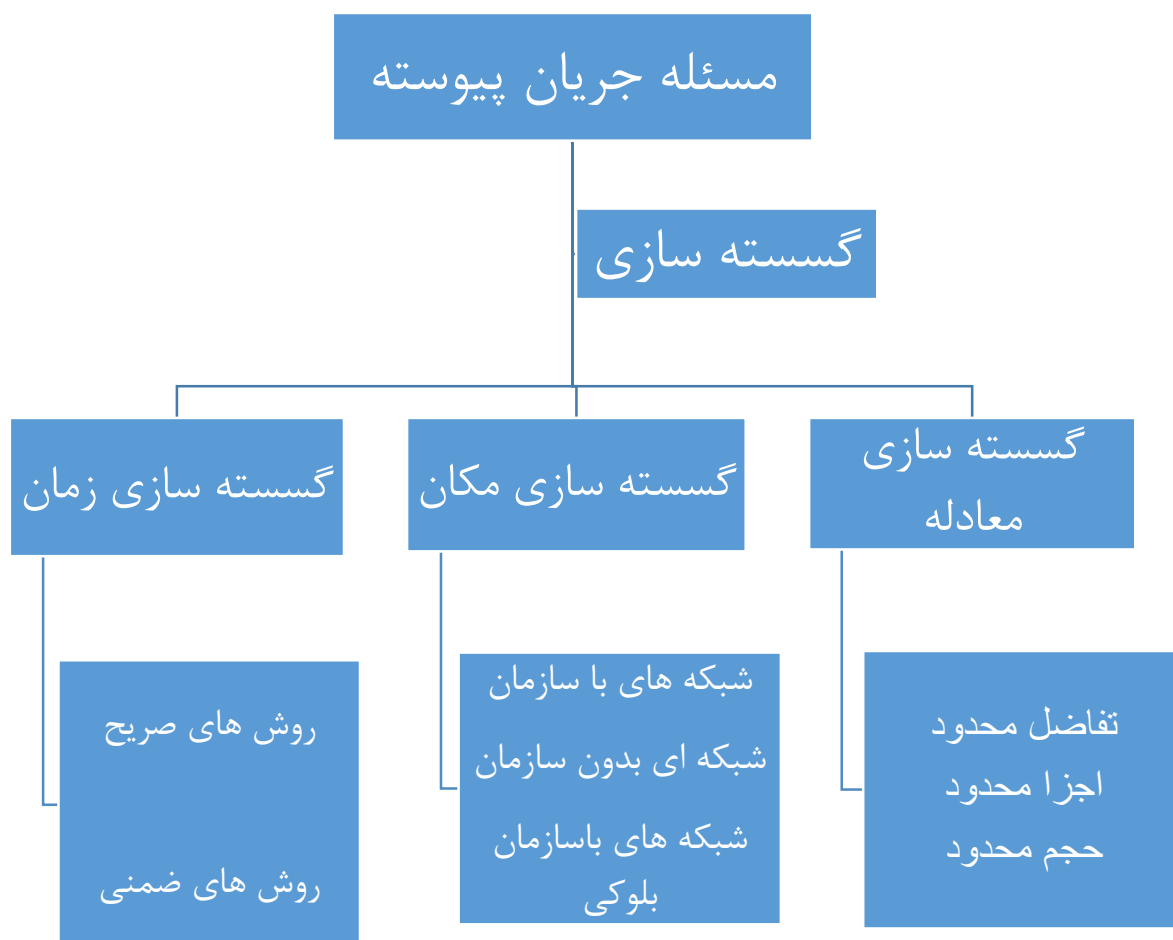
گسسته سازی می تواند برای مشتق مرتبه اول مانند $\frac{\partial}{\partial t}$ و مشتق مرتبه دوم مانند $\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$ و مشتق مکانی

$\frac{\partial}{\partial x}$ و مشتق زمانی $\frac{\partial}{\partial t}$ باشد. بنابراین گسسته سازی مقادیر، تعیین همه متغیرها در قلمرو حل در همه

نقاط شبکه و همه زمان ها می باشد. طبق شکل ۲-۳ شبیه سازی عددی شامل بحث های گسسته

سازی زیر می باشد:

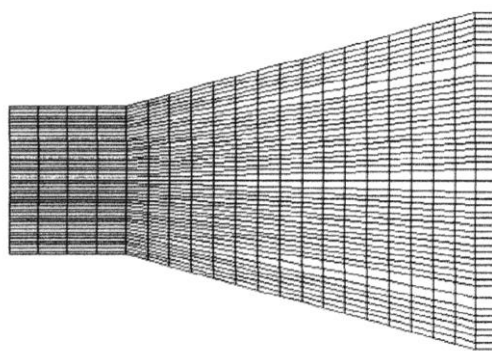
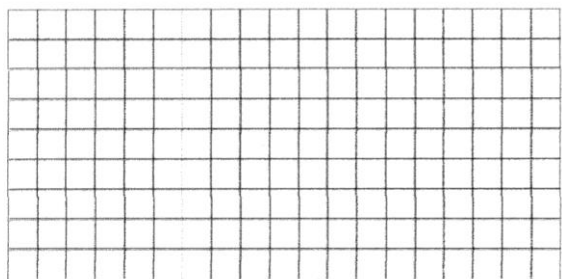
- گسسته سازی مکان
- گسسته سازی معادله
- گسسته سازی زمان



شکل ۳-۲- گسسته سازی یک مسئله جریان

گام اول یک شبیه سازی، تعریف هندسه می باشد. قلمرو جریان در مکان تفکیک می شود، و سبب ایجاد یک شبکه می گردد که مجهولات روی نقاط این شبکه تعیین می گردند.

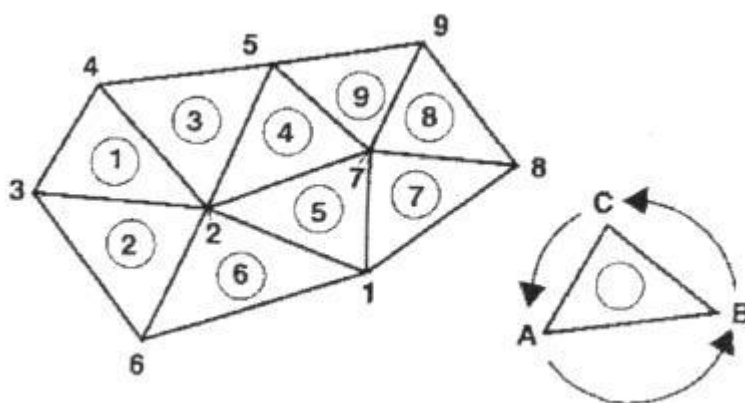
گسسته سازی معادلات باعث تغییر معادلات دیفرانسیلی جزئی به معادلات جبری گسسته که شامل مقادیر مجهول در نقاط شبکه می شود، انجام می گیرد. گسسته سازی در زمان باعث می گردد که مقادیر مجهول در یک سری زمان های خاص تعیین گردند. روش ها و تکنیک های بسیار متفاوتی برای گسسته سازی مکانی، معادله و زمان وجود دارد.



الف. کارتیزین

ب. شبکه بندی منطبق شده بر بدنه

شکل ۳-۳- شبکه بندی با سازمان

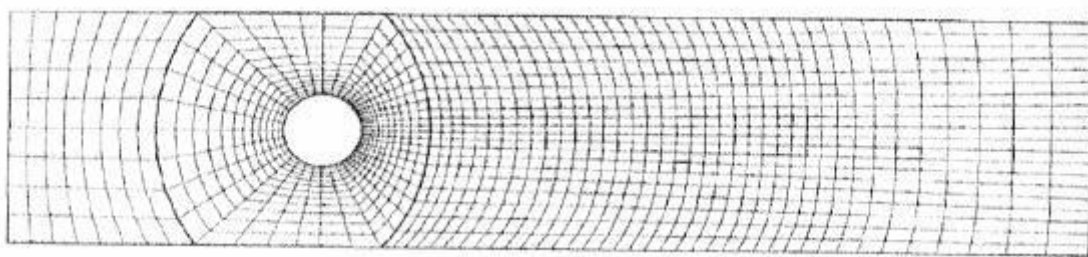


شکل ۳-۴- شبکه بندی بدون سازمان

شبکه های با سازمان بلوکی برای محاسبه جریان در مناطق پیچیده به منظور ایجاد راه حل های موثر برای شبکه های با سازمان گسترش یافته است. در شبکه با سازمان بلوکی، از زیر مجموعه های دارای سازمان برای حوزه حل استفاده می گردد. شکل ۳-۵ شبکه با سازمان را برای محاسبه جریان اطراف یک استوانه نشان می دهد. که شامل سه بلوک مختلف می باشد، در منطقه ورودی و خروجی، شبکه نسبتاً بزرگ است چون جریان نسبتاً یکنواخت می باشد، منطقه اطراف استوانه با شبکه بندی ریزتر می باشد، چون جریان با گرادیان های تندتر انتظار می رود. هرگاه هندسه خیلی پیچیده نباشد به طوریکه بتوان آن را به بلوک های مختلفی تقسیم بندی کرد، استفاده از شبکه های با سازمان بلوکی

موثرتر از شبکه های بدون سازمان می باشد. محاسبه عملیات بطور جداگانه در هر بلوک انجام می شود، که حل هر بلوک شرایط مرزی را برای بلوک مجاورش فراهم می کند.

همه روش های توضیح داده شده برای گسسته سازی منطقه جریان استفاده می شود و انتخاب روش به مسئله جریان برای محاسبه بستگی دارد. برای ساده ترین مسئله جریان در یک قلمرو ساده هندسی ساده ترین شبکه به کار می رود. برای مثال، جریان کانال مستقیم در شکل ۳-۳ الف را می توان با یک شبکه کارتیزین محاسبه نمود. جریان اطراف یک استوانه با یک شبکه بدون سازمان یا یک شبکه با سازمان بلوکی مدل سازی می شود. به هر حال، یک رابطه قوی بین گسسته سازی مکان و معادله وجود دارد، یعنی هرگاه روش گسسته سازی معادلات انتخاب شود، انتخاب روش گسسته سازی مکانی برای استفاده کردن محدود می شود. جدول ۳-۱ روش مناسب گسسته سازی مکانی را با توجه به گسسته سازی معادلات ارائه می دهد. روش های گسسته سازی معادلات در بخش بعدی بحث می شود.



شکل ۳-۵- شبکه با سازمان بلوکی

جدول ۳-۱- روش های گسسته سازی مکان و مقدمات شبکه

روش	مقدمات شبکه	توضیحات
تفاضل های محدود	کارتیزین با سازمان	➤ تولید شبکه موثر
	کارتیزین با سازمان بلوکی	➤ محدود به مناطق جریان ساده

<p>➤ تولید شبکه موثر</p> <p>➤ مناطق جریان پیچیده</p>	<p>منطبق بر بدنه با سازمان</p> <p>کارتزین ساده</p> <p>بدون سازمان</p> <p>با سازمان بلوکی</p>	<p>حجم های محدود</p>
<p>➤ تولید شبکه موثر</p> <p>➤ مناطق جریان پیچیده</p>	<p>بدون سازمان</p>	<p>اجزای محدود</p>

۳-۳-۳. گسسته سازی معادله

هرگاه یک شبکه با معادلات تعریف شود می توان با استفاده از جایگزین کردن مشتقات جزئی ظاهر شده در معادلات حاکم دینامیک سیالات با معادلات تفاضل جبری خطی یا غیر خطی شود و می توان متغیرهای مجهول میدان جریان را در نقاط شبکه حل کرد. سه روش برای گسسته سازی عملگرهای دیفرانسیلی وجود دارد:

- روش تفاضل محدود^۱
- روش اجزا محدود^۲
- روش حجم محدود^۳

تقسیم بندی این روش ها بر حسب انعطاف پذیری و دقت در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. در روش اجزا محدود انعطاف پذیری زیاد است، چون گسسته سازی در فضا بر اساس شبکه های بدون سازمان می باشد.

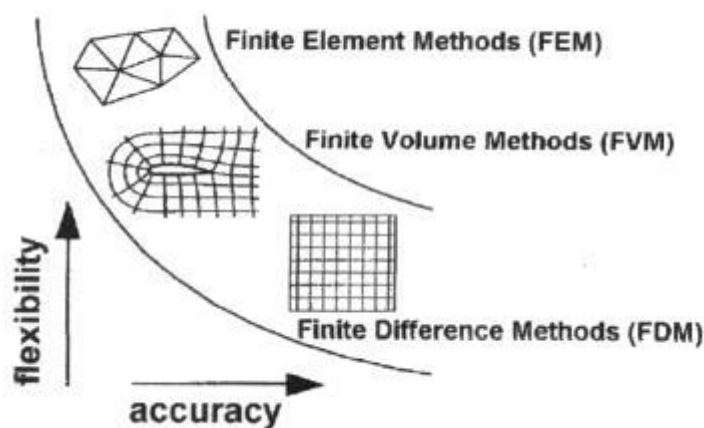
روش های حجم محدود و تفاضل محدود بر پایه شبکه های باسازمان است، حجم های محدود نسبت به تفاضل محدود دارای انعطاف پذیری بیشتری است چون حجم یک سلول بطور اختیاری می تواند

^۱ Finite Difference Method- FDM

^۲ Finite Element Method- FEM

^۳ Finite Volume Method- FVM

انتخاب شود و از مختصات منحنی شکل می توان استفاده کرد و بنابراین مرز متناسب قلمروهای حل ممکن است. به هر صورت، روش تفاضل محدود برای محاسبات نیاز به یک دستگاه مختصات کارترین دارد و نه تبدیلات مختصاتی (مانند FVM) یا توابع وزن (مانند FEM). بنابراین هرگاه بتوان از خطاهای گرد کردن اجتناب کرد محاسبات دارای دقت بیشتری خواهد بود.



شکل ۳-۶- مقایسه روش های گسسته سازی

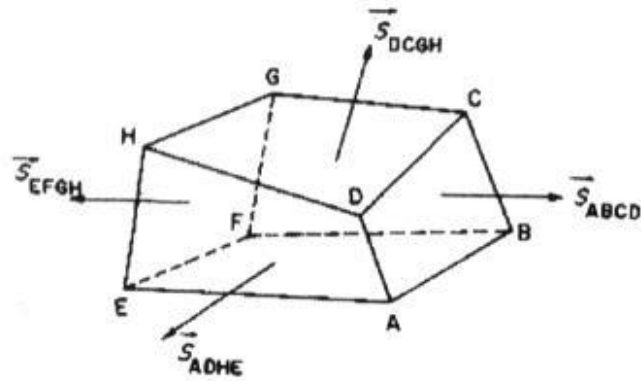
۳-۳-۱- روش حجم محدود

روش حجم محدود اولین مرتبه بوسیله مک کرمک^۱، مکدونالد^۲ و پاولی^۳ برای حل معادلات دو بعدی اویلر به وجود آمد. در این روش قلمرو حل مسئله به یک شبکه با احجام محدود تبدیل می شود، بطوریکه در محاسبات دو بعدی از چهار ضلعی و از حجم کنترل شش وجهی برای معادلات سه بعدی استفاده می گردد (شکل ۳-۷). این روش می تواند برای هر دو روش شبکه بندی، شبکه های باسازمان یا بدون سازمان استفاده شود.

^۱ Mac Cormack

^۲ Mac Donald

^۳ Pully



شکل ۳-۷- سلول حجم محدود برای محاسبات سه بعدی

معادلات دیفرانسیلی جزئی روی احجام کنترل محدود با استفاده از تئوری گوس انتگرال گیری می شود. انتگرال حجم ترم های سمت چپ معادله نایر - استوکس به انتگرال های سطحی روی وجوه حجم های محدود تبدیل می شود. تئوری انتگرال گوس برای یک کمیت اسکالر U روی حجم Ω به صورت زیر نوشته می شود:

$$\int_{\Omega} (\nabla U) d\Omega = \int_S (nU) dS = \oint_S U n dS \quad (۱۰-۳)$$

عمگر نابلا ∇ بصورت زیر تعریف می شود:

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (۱۱-۳)$$

که S سطح، و با بردار عضو سطح dS بیرون از سطح نشان داده می شود. تئوری گوس بیان می کند، که دیورژانس یک کمیت اسکالر $\nabla \cdot U$ در یک حجم کنترل Ω برابر است با شارهای عبور کرده از طریق سطوح S این حجم کنترل می باشد.

معادلات بقای حاکم در یک شکل کلی بصورت زیر می توان نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (C_i \cdot U + D_i) = S_i \quad (12-3)$$

که $C_i U$ ترم های انتقال^۱، D_i ترم های انتشار^۲ و S_i ترم های منبع در قوانین بقای جرم می باشد.

بقای جرم بدین معنی است که معاله پیوستگی می تواند با قرار دادن پارامترهای زیر بدست آید:

$$C_i = 1, \quad D_i = 0, \quad S_i = 0$$

برای بقای مومنتوم پارامترها بصورت $C_i = U_i$ ، D_i نشان دهنده تنش های برشی رینولدز می باشد و

ترم های منبع بیانگر فشار و نیروهای داخلی می باشد. ترم های ذکر شده در بالا را می توان بطور مشابه

برای معادلات آشفتگی استفاده نمود. انتگرال گیری معادلات پیوستگی به بیان زیر تبدیل می شود:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} U d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x_i} (C_i \cdot U + D_i) d\Omega = \int_{\Omega} S_i d\Omega \quad (13-3)$$

حال تئوری گوس را بکار می بریم، می توان انتگرال را به یک مجموعه روی شش سطح یک سلول

حجمی جدا کرد (شکل ۳-۷). بردار سطح \vec{S}_l بصورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{S}_i = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = n_l \cdot A_l, \quad l = 1, 2, \dots, 6 \quad (14-3)$$

که n بردار عمود سطح A با مساحت A می باشد.

برای هر حجم محدود، معادلات حاکم را می توان بطور تقریبی بصورت زیر نشان داد:

$$\frac{\partial}{\partial t} U \Omega_{ijk} + \sum_{m=1}^3 \sum_{l=1}^6 [(C_i \cdot U + D_i)_{lm}]_{ijk} = 0 \quad (15-3)$$

که Ω_{ijk} حجم سلول واقع در مکان i, j, k در محدوده می باشد. مجموع ترم های جریان

به تمام وجه های خارجی حجم محدود Ω اشاره می کند. با توجه به شکل ۳-۷

^۱ Convective

^۲ Diffusive

ترم های جریان روی شش وجه حجم محدود مکعبی جمع می شود، که لزومی ندارد چهار نقطه تشکیل دهنده یک سطح سلول در یک صفحه باشد. احجام ومساحت های سطح سلول باید به دقت ارزیابی شوند. به منظور اطمینان از اینکه جمع احجام محاسبه سلول های مجاور در واقع معادل با حجم کل سلول های ترکیب شده یعنی منطقه محاسباتی باشد. برای یک چهار گوش ABCD مساحت A می تواند از طریق زیر محاسبه شود:

(۱۶-۳)

$$A_{ABCD} = \frac{1}{2} |\bar{x}_{AC} \times \bar{x}_{BD}| = \frac{1}{2} [(x_C - x_A)(y_D - y_B) - (y_C - y_A)(x_D - x_B)]$$

$$= \frac{1}{2} (\Delta x_{AC} \cdot \Delta y_{BD} - \Delta x_{BD} \cdot \Delta y_{AC})$$

سمت راست معادله ۱۶-۳ برای یک سطح ABCD، که A, B, C, D در خلاف جهت عقربه های ساعت قرار گرفته اند مثبت می باشد. با بکار بردن معادله ۱۶-۳ می توان بردار از سطح بطرف خارج \vec{S}_l را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\vec{S}_{ABCD} = \frac{1}{2} |\bar{x}_{AC} \times \bar{x}_{BD}| \quad (۱۷-۳)$$

برای ارزیابی حجم های مکعبی، معادلات مختلفی می تواند استفاده شود. رایج ترین روش شامل تقسیم مجدد به چهار وجهی یا هرم می باشد. حجم یک چهار وجهی Ω_{PABC} با بکار بردن بیان برداری ثنوری گوس بصورت زیر نوشته می شود:

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot \vec{a}) d\Omega = \oint_S \vec{a} \cdot d\vec{s} \quad (۱۸-۳)$$

که \vec{a} یک بردار اختیاری است، بشرطی که:

$$\Omega_{PABC} = \frac{1}{3} \oint_{PABC} \vec{x} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{3} \sum_{faces} \vec{x} \cdot \vec{S}_{faces} \quad (۱۹-۳)$$

که بردار \vec{a} با بردار موقعیت \vec{x} جایگزین می شود.

انتگرال گیری مستقیم معادلات ناویر استوکس و سادگی تئوری گوس مزیت های مهم روش های FV می باشند.

۳-۳-۴. گسسته سازی زمان

تفاوت معادلات ناویر-استوکس دائمی و غیر دائمی وجود متغیر اضافی زمان می باشد. معادلات جریان غیر دائمی سهموی می باشند یعنی معادلات در یک زمان t^{n+1} (بطور قرارداد شاخص برای زمان در دینامیک سیالات محاسباتی بصورت بالانویس نشان داده می شود) که n شرایط در زمان t و $n+1$ شرایط در زمان $t + \Delta t$ را تنها به وسیله شرایط جریان در گام های زمانی قبلی، با $n > 0$ مشخص می کند. بسته به لحظه t که مشتق زمانی گرفته می شود محاسبات جریان غیر دائمی می تواند با روش های صریح و ضمنی انجام گیرد. در روش های صریح یک تفاضل پیشرو در زمان گرفته می شود و محاسبات برای زمان t^{n+1} ، فقط از مقادیر گام های زمانی استفاده می شوند. بنابراین مقادیر مجهول در زمان $n+1$ با استفاده از مقادیر معلوم در زمان n محاسبه می گردند. این روش باعث می شود که حداقل تعداد مجهولات را داشته باشیم و بنابراین حداقل عملیات برای هر گام زمانی نیاز است. در روش های ضمنی یک تفاضل پسرو نسبت به زمان استفاده می شود، که باعث یک سری متغیرهای مجهول در همان مرحله زمان می شود. برای محاسبه مجهولات در زمان $n+1$ ، لازم است به تعداد مجهولات، معادلات چند مجهولی بطور همزمان حل گردند. بنابراین یک دستگاه معادلات جبری در همه نقاط شبکه از مقادیر مجهول در گام زمانی t^{n+1} نوشته شده که باید بطور همزمان حل شود. بنابراین روش های ضمنی منجر به حل دستگاه های بزرگ معادلات جبری خطی همزمان می شود، که می توان آن ها را ماتریس نشان داد و از روش های حل ماتریس استفاده نمود.

روش صریح:

مزیت: برای برنامه نویسی نسبتا ساده می باشد.

عیب: Δt باید خیلی کوچک باشد که پایدار بماند، در نتیجه زمان اجرای برنامه طولانی خواهد شد.

روش ضمنی:

مزیت: برای مقادیر بسیار بزرگ Δt پایداری حفظ می شود، از اینرو گام های اندکی استفاده می شود.

عیب: برنامه نویسی دارای پیچیدگی بیشتر خواهد شد. بنابراین در هر گام زمانی ماتریس بزرگی باید ایجاد شود، زمان محاسبه برای هر گام زمانی تنها بیشتر از روش صریح می باشد.

۳-۴. آشنایی با نرم افزار فلونت

تقریباً جریان سیالاتی که ما در زندگی روزانه با آن مواجه می شویم آشفته هستند. مانند جریان در کانال ها و سازه های هیدرولیکی، جریان در لوله ها، اطراف و داخل ماشین ها، هواپیماها و ساختمان ها لایه مرزی آشفته هستند. بنابراین هرگاه که ما جریان سیال را بخواهیم محاسبه کنیم به احتمال زیاد آشفته خواهد بود [۱۴].

در جریان آشفته معمولاً متغیرها را در یک بخش متوسط زمانی \bar{U} ، که مستقل از زمان می باشد و یک بخش نوسانی تقسیم می کنیم بنابراین داریم $U = \bar{U} + u$.

تعریفی درباره جریان آشفته وجود ندارد، اما یک سری از تعاریف مشخص از خصوصیات سیال مانند زیر وجود دارد [۱۴].

۱. بی نظمی^۱

جریان آشفته بی نظم، تصادفی و پرهرج ومرج می باشد. این جریان شامل یک طیف مقیاس های مختلف (اندازه های گرداب) می باشد که بزرگترین گرداب ها از هندسه جریان تبعیت می کند (مانند، ضخامت لایه مرزی، پهنای جت). از طرف دیگر کوچکترین گرداب هایی را داریم که بوسیله نیروهای ویسکوز (تنش ها) انرژی داخلی را تلف می کنند.

^۱ Irregularity

۲. ضریب پخش^۱

در جریان آشفته ضریب پخش افزایش می یابد. بدین معنی که میزان پخش شدگی لایه های مرزی، جت ها، و غیره بعنوان جریان آشفته افزایش پیدا می کند. آشفتگی باعث افزایش تبادل ممنتوم در لایه های مرزی می شود. همچنین افزایش ضریب پخش، افزایش مقاومت (اصطکاک دیوار) در جریانات داخلی مانند داخل کانال ها و لوله ها را موجب می شود.

۳. اعداد رینولدز بزرگ

جریان آشفته در اعداد رینولدز بالا اتفاق می افتد. برای مثال، انتقال به جریان آشفته در لوله ها در $Re_D = 2300$ و در لایه های مرزی در $Re_D = 100000$ اتفاق می افتد.

۴. سه بعدی

جریان آشفته همواره سه بعدی است. هرچند که، هرگاه معادلات متوسط زمانی هستند می توانیم جریان را به عنوان دو بعدی در نظر بگیریم.

۵. اتلاف

جریان آشفته اتلاف کننده می باشد، به عبارت دیگر انرژی جنبشی را در گرداب های کوچک (اتلاف کننده) به انرژی داخلی تبدیل می کنند. گرداب های کوچک انرژی جنبشی را از گرداب های اندکی بزرگ دریافت می کنند. گرداب های اندکی بزرگ انرژی شان را از گرداب های بزرگتر و مانند آن بدست می آورند. گرداب های بزرگ انرژی شان را از جریان متوسط می گیرند. این فرآیند انتقال انرژی از بزرگترین مقیاس های آشفتگی (گرداب ها) به کوچکترین، فرآیند آبشار^۲ نامیده می شود.

۶. پیوستگی

^۱ Diffusivity

^۲ Cascade

با دلیل اینکه مقیاس های کوچک آشفتگی در جریان بزرگتر از مقیاس ملکولی هستند می توان جریان را بعنوان پیوسته در نظر گرفت.

۳-۵. مدل های آشفتگی

هرگاه جریان آشفته باشد بهتر است متغیرهای آنی (برای مثال مولفه های سرعت و فشار) به یک مقدار متوسط و یک مقدار نوسانی تجزیه شوند:

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad P = \bar{P} + p_0 \quad (۳-۲۰)$$

یکی از دلایلی که متغیرها را تجزیه می کنند این است که هرگاه مقادیر جریان را اندازه می گیرند معمولاً به مقادیر متوسط نسبت به زمان گذشته علاقه مند هستند. دلیل دیگر این است که برای حل عددی معادله ناویر-استوکس آن نیاز به شبکه بندی بسیار ریز برای حل همه مقیاس های آشفتگی دارند و آن نیز نیاز به یک تفکیک کوچک زمانی دارد (همیشه جریان آشفته غیر دائمی است).

معادله پیوستگی و معادله ناویر-استوکس بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho U_i)_{,i} = 0 \quad (۳-۲۱)$$

$$(۳-۲۲)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + (\rho U_i U_j)_{,j} = -P_{,i} + \left[\mu \left(U_{i,j} + U_{j,i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} U_{k,k} \right) \right]_{,j}$$

که δ_{ij} نشان دهنده مشتق نسبت به x_j می باشد. چون در مورد جریان تراکم ناپذیر (یعنی عدد ماخ پایین) بحث می شود ترم اتساع در طرف سمت راست معادله ۳-۲۲ نادیده فرض می شود یعنی:

$$(۳-۲۳)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + (\rho U_i U_j)_{,j} = -P_{,i} + \left[\mu (U_{i,j} + U_{j,i}) \right]_{,j}$$

توجه کنید که در اینجا از اصطلاح تراکم ناپذیر استفاده شده است یعنی چگالی مستقل از فشار می باشد $(\partial P / \partial \rho = 0)$ اما بدین معنی نیست که چگالی ثابت است، بلکه می تواند وابسته به دما و غلظت باشد.

با قرار دادن معادله ۳-۲۱ در معادله پیوستگی ۳-۲۲ و معادله ناویر-استوکس ۳-۲۳ معادله پیوستگی متوسط زمانی و معادله ناویر-استوکس بدست می آید:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho \bar{U}_i)_{,i} = 0 \quad (۳-۲۴)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial t} + (\rho U_i U_j)_{,j} = -P_{,i} + [\mu (\bar{U}_{i,j} + \bar{U}_{j,i}) - \rho \overline{u_i u_j}]_{,j} \quad (۳-۲۵)$$

ترم جدید $\overline{u_i u_j}$ در سمت راست ۳-۲۵ ظاهر می شود که تانسور تنش رینولدز نامیده می شود. تانسور متقارن می باشد (برای مثال $\overline{u_1 u_2} = \overline{u_2 u_1}$). این نشان دهنده رابطه های بین سرعت های نوسانی است. این ترم تنش اضافی به علت آشفتگی (سرعت های نوسانی) می باشد و نامعلوم است.

برای حل معادله ۳-۲۵ روش های گوناگونی استفاده می شود که شامل:

- مدل های جبری^۱: یک معادله جبری برای محاسبه یک لزجت آشفته که اغلب لزجت گردابی نامیده می شود، کاربرد دارد. تانسور تنش رینولدز پس از استفاده کردن از یک فرض که از تانسور تنش رینولدز با گرادیان های سرعت و لزجت آشفتگی رابطه برقرار می کند، محاسبه می شود. این فرضی، فرض بوزینسک^۲ نامیده می شود.
- مدل های یک معادله ای: در این مدل ها یک معادله انتقالی برای یک کمیت آشفته (معمولا انرژی جنبشی آشفتگی) حل می شود و یک کمیت آشفته ثانویه (معمولا مقیاس طول آشفتگی) از یک معادله جبری بدست می آید. لزجت آشفتگی از فرض بوزینسک محاسبه خواهد شد.
- مدل های دو معادله ای: این مدل ها در بخش مدل های لزجت گردابی قرار می گیرند. دو معادله انتقال بدست می آید که انتقال دو اسکالر، برای مثال انرژی جنبشی آشفته k و اتلاف آن ϵ را توضیح می دهد. تانسور تنش رینولدز پس از محاسبه شدن از یک فرض استفاده

^۱ Algebraic Models

^۲ Bossinesq Assumption

می کند که تانسور تنش رینولدز با گرادیان های سرعت و یک لزجت گردابی رابطه برقرار می کند.

➤ مدل های تنش رینولدز: در اینجا چند معادله انتقالی برای تانسورهای تنش $\overline{u_i u_j}$ استفاده می گردد. یک معادله انتقال برای تعیین مقیاس طولی آشفتگی اضافه می شود. معمولا یک معادله برای اتلاف ϵ استفاده می شود.

انواعی گوناگون مدل های آشفتگی گفته شده در بالا برحسب پیچیدگی، توانایی مدل سازی آشفتگی و هزینه کار محاسباتی با هم متفاوتند.

در نرم افزار فلوئنت روش های زیادی برای مدل سازی جریان آشفته وجود دارد که شامل موارد زیر می باشد:

- مدل اسپالات – آلماراس
- مدل های $k-\epsilon$
 - مدل Standard
 - مدل RNG
 - مدل Realizable
- مدل های $k-\omega$
 - مدل $k-\omega$ standard
 - مدل $k-\omega$ sst
- مدل تنش رینولدز^۱
- شبیه سازی گرداب جدا^۲

^۱ The Reynolds Stress Transport-SST

^۲ The Detached Eddy Simulation Model-DES

○ شبیه سازی گرداب بزرگ^۱

متاسفانه یک حالت کلی برای مدل کردن همه مسائل آشفتگی وجود ندارد. انتخاب مدل آشفتگی بستگی به ملاحظاتمانند محیط فیزیکی جریان، سطح دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی دسترس و میزان زمان دسترس برای شبیه سازی دارد. برای انتخاب مدل مناسب، نیاز به فهمیدن کاربردها و محدودیت های انتخاب های گوناگون می باشد. در اینجا به توضیح انواع روش های $k-\epsilon$ می پردازیم.

۳-۵-۱. مدل های $k-\epsilon$ استاندارد، RNG و محسوس

در این قسمت مدل های $k-\epsilon$ استاندارد، RNG، و محسوس بررسی می شود. همه ی مدل ها برای تشکیل معادلات انتقال برای k و ϵ مانند هم هستند. اختلافات اصلی در مدل ها در زیر بیان شده است:

روش محاسبه لزجت آشفتگی

اعداد پرانتل^۲ آشفتگی حاکم بر پخش شدگی آشفتگی k و ϵ

تولید و افت بر حسب معادله ϵ

معادلات انتقال، روش های محاسبه ویسکوزیته آشفتگی، و ثابت های مدل، بطور جداگانه برای هر مدل ارائه می شود. خصوصیتی که برای همه مدل ها مشترک هستند، شامل تولید آشفتگی، تولید نیرو به علت خاصیت شناوری، محاسبه اثرات تراکم پذیری، و مدل سازی انتقال گرما و جرم می باشد.

^۱ The Large Eddy Simulation Model-LES

^۲ Prantdtl

۳-۵-۱-۱. مدل k-ε استاندارد

ساده ترین "مدل های کامل" آشفتگی، مدل های دو معادله ای هستند که حل دو معادله انتقال جدا اجازه می دهد که سرعت آشفتگی و مقیاس طولی بطور مستقل تعیین شود. مدل استاندارد k-ε مدلی نیمه تجربی براساس مدل سازی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ (ε) است.

معادله انتقال مدل برای k از معادله دقیق بدست می آید. در حالی که معادله انتقال مدل برای ε با استفاده از منطقی فیزیکی و ریاضی وار دقیق بدست می آید [۱۵].

در مدل k-ε فرض می شود که جریان بطور کامل آشفته است، و اثرات مولکولی لزجت قابل صرف نظر کردن می باشد. بنابراین مدل استاندارد k-ε فقط برای جریانات کاملا آشفته معتبر است.

۳-۵-۱-۱-۱. معادلات انتقال برای مدل استاندارد k-ε

انرژی جنبشی آشفته k و نرخ اتلاف آن ε از معادلات انتقال زیر بدست می آید:

(۳-۲۶)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

و

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (۳-۲۷)$$

(۲۷)

در این معادلات، G_k بیانگر تولید انرژی جنبشی به علت گرادیان های سرعت متوسط است. G_b تولید انرژی جنبشی آشفته به علت خاصیت شناوری می باشد. Y_m سهم انبساط نوسانات در آشفتگی به هم فشرده برای همه نرخ افت است. $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ مقادیر ثابت هستند. σ_k و σ_ε اعداد پرنتل آشفتگی برای k و ε هستند.

۳-۵-۱-۱-۲. مدل سازی لزجت آشفتگی

لزجت آشفتگی μ_t ، بوسیله ی ترکیب k و ε به طریق زیر محاسبه می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۳-۲۸)$$

که C_μ ثابت می باشد.

ثابت های مدل $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، σ_k و σ_ε دارای مقادیر زیر هستند:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

این مقادیر قراردادی از آزمایشات با هوا و آب برای جریانات برشی آشفته بدست می آیند و تجربه آزمایشگاهی نشان داده که مقادیر مناسبی می باشند.

اگرچه مقادیر قراردادی ثابت های مدل که استاندارد هستند را افراد بیشتری قبول دارند، اما می توان آن ها را در مدل لزج تغییر داد.

۳-۵-۱-۲. مدل RNG k-ε

مدل RNG k-ε با استفاده از یک روش آماری سخت بدست می آید (معروف به نظریه گروه عادی سازی) شبیه به مدل استاندارد k-ε می باشد، اما شامل ویژگیهای مخصوص زیر است:

- مدل RNG یک عبارت اضافی در معادله ی ε دارد که برای برخی از جریانات دارای دقت بیشتری خواهد بود.

- در مدل RNG برای بالا بردن دقت برای جریانات چرخشی، اثر چرخش روی آشفتگی در نظر گرفته می شود.

- نظریه RNG یک فرمول تحلیلی برای اعداد پرناتل آشفتگی را فراهم می سازد. در حالیکه در مدل استاندارد k-ε کاربران مخصوص مقادیر ثابت، استفاده می کنند.

- در حالیکه مدل استاندارد k-ε یک مدل عددی برای اعداد رینولدز بالا می باشد، نظریه RNG یک فرمول دیفرانسیلی مشتق تحلیلی برای لزجت فراهم می کند که برای اثرات اعداد رینولدز کم محاسبه می شود. اما موثر بودن استفاده از این خصوصیات، به رفتار مناسب منطقه مجاور دیوار بستگی دارد [۱۶]. این خصوصیات مدل RNG k-ε دقت بیشتر و قابل اطمینان تری برای بیشتر جریانات نسبت به مدل استاندارد k-ε را فراهم می کند.

اساس RNG مدل آشفته k-ε از معادلات ناویر استوکس لحظه ای بدست آمده، استفاده از یک روشی ریاضی بنام روش های "گروه معمولی سازی" (RNG) می باشد.

۳-۵-۱-۲-۱. معادلات انتقال برای مدل RNG k-ε

مدل RNG k-ε معادلات شبیه به مدل استاندارد k-ε دارد:

(۲۹-۳)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (۳۰-۳)$$

در این معادلات G_k نشان دهنده تولید انرژی آشفته به علت گرادیان های سرعت متوسط است. G_b تولید انرژی جنبشی آشفته به علت خاصیت شناوری است. Y_M نشان دهنده سهم انبساط نوسان در آشفتگی فشرده برای نرخ افت کلی است. مقادیر α_k و α_ε به ترتیب معکوس اعداد پرانتل موثر برای k و ε می باشد.

۳-۵-۱-۲-۲. مدل سازی لزجت موثر

روش حذف مقیاس در نظریه RNG در یک معادله دیفرانسیلی برای لزجت آشفتگی نتیجه می دهد:

(۳۱-۳)

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v}$$

که

$$\hat{v} = \mu_{eff} / \mu$$

$$C_v \approx 100$$

در محدوده اعداد رینولدز بالا، معادله ۳-۳۱ به صورت زیر تبدیل می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۳۲-۳)$$

که با استفاده از نظریه RNG، $C_\mu = 0.845$ بدست می آید.

۳-۱-۵-۳. مدل k-ε محسوس

مدل k-ε محسوس متفاوت از مدل k-ε استاندارد می باشد و دارای دو تفاوت مهم زیر است:

- مدل k-ε محسوس شامل یک فرمول جدید برای لزجت آشفتگی است.
- یک معادله انتقال جدید برای نرخ افت، ε، از یک معادله دقیق برای انتقال متوسط مربع نوسانات گردابی ناشی شده است.

اصطلاح محسوس به این معنی است که مدل قیود مشخص ریاضی در تنش های رینولدز را اقلع می نماید که سازگار با فیزیک جریان آشفته می باشد. هیچ یک از مدل های k-ε استاندارد و k-ε RNG، محسوس نیستند [۱۷].

مزیت مدل k-ε محسوس به این است که دقت بیشتری برای پیش بینی نوع گسترش جت صفحه ای و جت سه بعدی را دارد. همچنین قابلیت مدل سازی بسیار خوبی برای جریانات شامل چرخش. لایه های مرزی که تحت گرادیان های فشار معکوس قوی، جداشدگی و دورانی را فراهم می کند.

هر دو مدل $k-\epsilon$ محسوس و RNG در جریان هایی با انحنای شدید خط جریان، گردابه ها، و چرخشی نسبت به $k-\epsilon$ استاندارد دارای عملکرد بهتری هستند. چون مدل هنوز نسبتاً جدید می باشد، بطور دقیق روشن نیست که نمونه های مدل $k-\epsilon$ محسوس عملکرد بهتری نسبت به مدل RNG دارد.

به هر حال، مطالعات اولیه نشان می دهد که مدل محسوس برای مدل سازی جریانات جدا شده و جریان های با خصوصیات جریان ثانویه پیچیده مناسب می باشد.

علاوه بر مدل $k-\epsilon$ استاندارد و براساس $k-\epsilon$ RNG که در بخش های ۳-۵-۱-۱ و ۳-۵-۱-۲ توضیح داده شد، فلوئنت مدل دیگری مشهور به مدل $k-\epsilon$ محسوس را فراهم می سازد. ترم محسوس به معنی این است که مدل توصیفات ریاضی مشخص روی تنش های عمودی، سازگار با فیزیک جریانات آشفته را به شکل مناسبی انجام می دهد. برای درک این موضوع، ترکیب رابطه بوزینسک و تعریف لزجت گردابی (معادله ۳ - ۲۸) را در نظر بگیرید برای بدست آوردن تعریف زیر برای تنش رینولدز عمودی در یک جریان متوسط تراکم پذیر:

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3-33)$$

مدل $k-\epsilon$ محسوس، شین همکاران [۱۴] به این علت ارائه شد که بتواند کمبودهای روش های معمول $k-\epsilon$ را با اتخاذ موارد زیر برطرف نماید:

- فرمول جدیدی برای تعیین لزجت گردابی بوسیله یک متغیر C_μ که بوسیله رینولدز قبلا پیشنهاد شده است [۱۸].
- یک معادله مدل جدید برای افت (ϵ) براساس معادله دینامیک نوسان گرداب مربع میانگین پیشنهاد گردید.

۳-۵-۱-۳-۱. معادلات انتقال برای مدل $k-\epsilon$ محسوس

معادلات انتقال مدل شده برای k و ϵ در مدل $k-\epsilon$ محسوس عبارتند از:

(۳۴-۳)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

(۳۵-۳)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

در این معادلات G_k نشان دهنده تولید انرژی آشفته به علت گرادیان های سرعت متوسط است. G_b تولید انرژی جنبشی آشفته به علت خاصیت شناوری است. Y_M نشان دهنده سهم انبساط نوسان در آشفتگی فشرده برای نرخ افت کلی است. C_2 و $C_{1\varepsilon}$ ثابت هستند و مقادیر σ_k و σ_ε به ترتیب اعداد پیرانتل موثر برای k و ε می باشد.

توجه کنید که معادله k (معادله ۳-۳۴) مانند مدل استاندارد k - ε (معادله ۳-۲۶) و مدل RNG k - ε (معادله ۳-۲۹) هستند تنها تفاوت آن ها در ثابت های مدل می باشد. اما، شکل معادله ε کاملا با مدل های استاندارد و RNG k - ε متفاوت می باشند (معادلات ۳-۲۷ و ۳-۳۰)

۳-۶. رفتار جریان در نزدیک دیوار برای جریان های آشفته محدود به دیوارها

جریان های آشفته بسیار تحت تاثیر وجود دیوارها می باشند. بدیهی است که میدان سرعت متوسط، تحت تاثیر شرایط عدم لغزش در دیوارها می باشد که باید در دیوارها اقلان گردد. خیلی نزدیک به دیوار، میرایی لزجت نوسانات سرعت مماسی را کاهش می دهد، به هر صورت، در قسمت خارجی تر محدوده نزدیک دیوار، آشفتگی بوسیله تولید انرژی جنبشی آشفتگی به علت گرادیان های بزرگ در سرعت متوسط به سرعت افزایش می یابد.

مدل سازی نزدیک دیوار روی صحت راه حل های عددی تاثیر می گذارد، تا آنجایی که دیوارها منبع مهم گرداب و آشفتگی متوسط هستند. در هر صورت، در منطقه نزدیک دیوار متغیر های حل، گرادیان

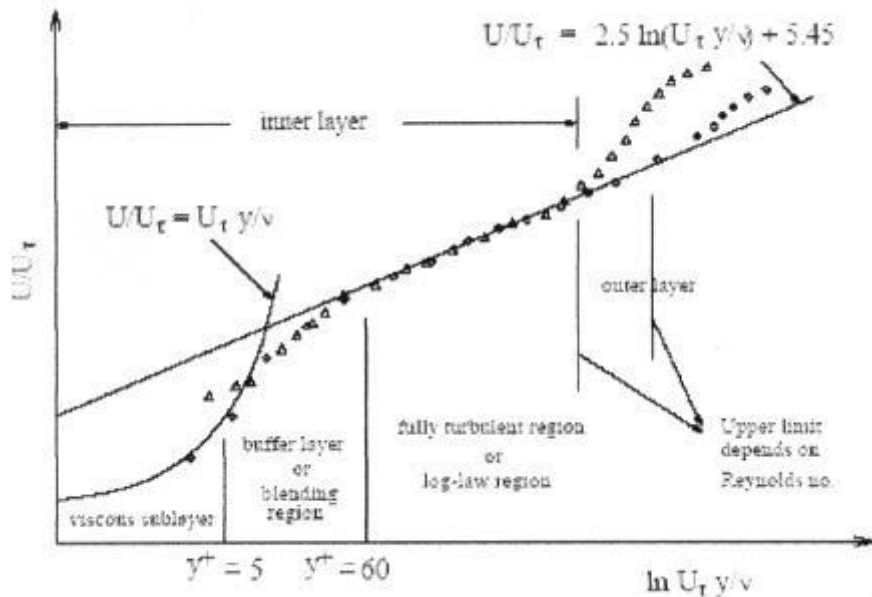
های بزرگی دارند، و ممنتوم و دیگر انتقال اسکالرها با بیشترین شدت اتفاق می افتد. از این رو، محاسبه دقیق جریان در محدوده نزدیک دیوار تعیین کننده موفقیت در تخمین جریان های آشفته محدود به دیوارها است.

مدل های $k-\epsilon$ ، RSM و LES در وحله اول برای هسته آشفتگی جریان ها معتبر هستند (یعنی برای جریان تا حدی دور از دیوار).

آزمایشات زیادی نشان می دهد که می توان محدوده نزدیکی دیوار را به سه لایه تقسیم نمود. در درونی ترین لایه، که زیر لایه لزج^۱ نامیده می شود، جریان تقریباً لایه ای است، و لزجت (ملکولی) یک نقش مهم در انتقال ممنتوم و گرما یا جرم، بازی می کند. در لایه خارجی، لایه کاملاً آشفته^۲ نامیده می شود، آشفتگی نقش مهمی بازی می کند. سرانجام منطقه میانی بین زیر لایه لزج و لایه کاملاً آشفته وجود دارد که اثرات لزجت ملکولی و لزجت آشفتگی به طور برابر مهم هستند. شکل ۳-۸ این تقسیم بندی های منطقه نزدیک دیوار که به شکل نیمه لگاریتم رسم شده است را نشان می دهد. در شکل ۳-۸، $y^+ \equiv \rho u_\tau y / \mu$ که در آن u_τ سرعت اصطکاکی است که بوسیله $\sqrt{\tau_w / \rho}$ تعیین می گردد.

^۱ Viscous Sublayer

^۲ Fully Turbulent Layer



شکل ۳-۸- قسمت های ناحیه نزدیک دیوار

۳-۶-۱. توابع دیوار در مقایسه با مدل نزدیک دیوار^۱

به طور معمول، دو روش برای مدل سازی منطقه نزدیک دیوار وجود دارد. در یک روش، منطقه داخلی که تحت تاثیر لزجت است (زیر لایه لزج و لایه میانی) حل نمی شوند. در عوض، فرمول های نیمه تجربی که توابع دیوار^۲ نامیده می شوند. برای متصل کردن ناحیه ای که تحت تاثیر لزجت است و منطقه کاملاً آشفته استفاده می شود. استفاده از توابع دیوار نیاز به اصلاح مدل های آشفته برای محاسبه وجود دیوار را برطرف می کند.

در روش دیگر، مدل های آشفتگی طوری تغییر می یابند که بوسیله یک مش که تا زیر لایه لزج امتداد دارد، قادر به حل ناحیه تحت تاثیر لزجت قرار گرفته باشند. برای ادامه بحث این روش "مدل سازی نزدیک دیوار" نام گذاری می شود. این دو روش بصورت ترسیمی در شکل ۳-۹ نشان داده شده اند. در

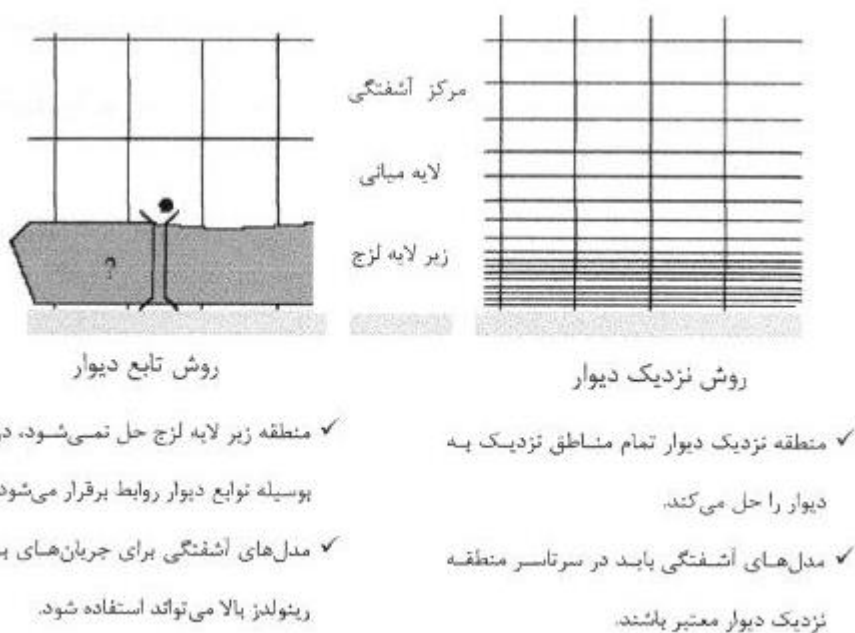
^۱ Near Wall Model

^۲ Wall Functions

بیشتر جریان های با اعداد رینولدز بالا، روش تابع دیوار به طور ذاتی باعث کاهش حجم محاسبات می گردد. چرا که ناحیه نزدیک دیوار که تحت تاثیر لزجت است، که متغیرهای حل سرعت تغییر می یابند، نیاز به حل ندارند. روش تابع دیوار، به علت آنکه اقتصادی، قوی و دقیق می باشد، بطور گسترده ای استفاده می گردد.

به هر حال، روش تابع دیوار، برای جریان های با اعداد رینولدز کم، مناسب نمی باشد، و فرضیه های اساسی توابع دیوار معتبر نخواهند بود. در چنین حالاتی نیاز به مدل های نزدیک دیوار که در منطقه زیر لایه لزج معتبر هستند و بنابراین قابل انتگرال گیری در سرتاسر دیوار می باشد وجود دارد.

فلوئنت هر دو روش تابع دیوار و روش مدل سازی مجاور دیوار را فراهم کرده است.



شکل ۳-۹- مدل سازی های جریان در نزدیک دیوار در فلوئنت

۳-۶-۲. توابع دیوار

توابع دیوار یک مجموعه فرمول ها و توابع نیمه تجربی هستند که در اثر "متصل کردن" یا "ارتباط" متغیرهای حل در سلولهای نزدیک دیوار و مقادیر متناظر روی دیوار بوجود می آیند. توابع دیوار شامل:

➤ قوانین دیوار برای سرعت و دما متوسط (یا دیگر اسکالر)

➤ فرمول های برای مقادیر آشفتگی نزدیک دیوار

فلوئنت دو انتخاب روش های تابع دیوار را پیشنهاد می کند:

➤ توابع دیوار استاندارد^۱

➤ توابع دیوار نامتعادل^۲

۳-۶-۲-۱. توابع دیوار استاندارد

توابع دیوار استاندارد در فلوئنت براساس پیشنهاد لاندر^۳ و اسپالدینگ^۴ می باشد [۲۰]، و برای مدل سازی جریان ها در صنعت استفاده بیشتری دارد. این گزینه بصورت پیش فرض در فلوئنت موجود می باشد.

۳-۶-۲-۲. ممنتوم^۵

قانون دیوار برای سرعت متوسط روابط زیر را ارائه میکند:

$$U^* = \frac{1}{k} \ln(Ey^*) \quad (۳۶-۳)$$

که

(۳۷-۳)

$$U^* = \frac{U_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_\omega / \rho}$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (۳۸-۳)$$

^۱ Standard Wall Functions

^۲ Non equilibrium Wall Functions

^۳ Launder

^۴ Spalding

^۵ Momentom

که در این رابطه K ثابت ون - کارمن^۱ می باشد که برابر 0.4187 در نظر گرفته می شود، E ثابت تجربی است که برابر $9/793$ در نظر گرفته می شود، U_p ، سرعت متوسط سیال در نزدیک دیوار و K_p انرژی جنبشی آشفتگی در نزدیک دیوار، y_p فاصله نقطه از کنار دیوار و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال می باشد.

قانون لگاریتمی برای سرعت متوسط برای $30 < y^* < 300$ معتبر می باشد. در فلوننت، قانون لگاریتم زمانی که $y^* > 11.225$ باشد بکار گرفته می شود.

هرگاه شبکه بندی بصورتی باشد که در سلول های دیوار مجاور $11.225 < y^*$ باشد، فلوننت رابطه فشار-کرنش لایه ای که بصورت زیر نوشته می شود را بکار می گیرد:

$$U^* = y^* \quad (3-39)$$

باید توجه کرد که، در فلوننت، قوانین دیوار برای سرعت و دمای متوسط براساس واحد دیوار، y^* و نه y^+ ($\equiv \rho u_\tau y / \mu$) می باشد. این مقادیر بطور تقریبی در لایه های مرزی آشفتنه متعادل، با هم برابر می باشند.

۳-۶-۲-۳. آشفتگی^۲

در مدل های $k-\epsilon$ (اگر گزینه برای بدست آوردن شرایط مرزی دیوار از معادله k موجود باشد)، معادله k در تمام منطقه شامل سلول های مجاور دیوار حل می شود. شرط مرزی برای k در دیوار بصورت زیر تحمیل می شود:

$$n \frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (3-40)$$

مختصات محلی عمود به دیوار می باشد.

^۱ Von Karmen

^۲ Turboulence

تولید انرژی جنبشی، G_k ، و نرخ افت آن، ε ، در سلول های مجاور دیوار، که منشاء ترم ها در معادله k هستند، براساس فرضیه تعادل محلی محاسبه می شوند. در این فرض، تولید k و نرخ اتلاف آن در حجم کنترل مجاور دیوار متعادل فرض می شود.

پس، تولید k از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{k \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p} \quad (41-3)$$

و ε بطریق زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{k y_p} \quad (42-3)$$

توجه کنید، همان طور که در اینجا نشان داده شد، شرایط مرزی دیوار برای حل متغیرها، شامل سرعت متوسط، دما، k و ε ، همه بوسیله توابع دیوار محاسبه خواهند شد. بنابراین، نگرانی در رابطه با شرایط مرزی در دیوارها وجود نخواهد داشت.

توابع دیوار استاندارد که تا اینجا توضیح داده شده است گزینه پیش فرض فلوئنت می باشند. توابع دیوار استاندارد بخوبی برای محدوده وسیعی از جریانات در کنار دیوار کار می کنند. اما، زمانی که وضعیت جریان از شرایط ایده آلی که این توابع با آن فرضیات بوجود آمده اند فاصله بگیرند دارای اعتبار نخواهند بود. در این بین، ثابت برشی و فرضیه تعادل محلی دارای محدودیت بیشتری نسبت به سایر توابع دیوار می باشند. از این رو، هرگاه جریانات نزدیک دیوار دارای گرادیان های شدید فشار باشند، و هر زمان جریان ها کاملا نامتعادل هستند، ارزش این توابع زیر سؤال می رود. توابع دیوار نامتعادل در این گونه موارد گزینه مناسبی می باشند.

۳-۶-۲-۴. توابع دیوار نامتعادل

علاوه بر تابع دیوار استاندارد که در بالا توضیح داده شد (که بطور پیش فرض برای جریان کنار دیوار استفاده می شوند) یک تابع دیوار نامتعادل نیز که بر پایه دو لایه می باشد، وجود دارد [۲۱]. عناصر کلیدی در توابع دیوار نامتعادل بشرح زیر هستند:

قانون لگاریتمی لاندرو اسپالدینگ " برای سرعت متوسط طوری تغییر یافته اند که نسبت به اثرات گرادیان فشار حساس می باشند.

مفهوم دو لایه اساسی برای محاسبه مقدار انرژی جنبشی آشفتگی ($\bar{G}_k, \bar{\epsilon}$) در سلولهای کنار دیوار به کار می رود.

قانون لگاریتم برای سرعت متوسط حساس به گرادیان های فشار برابر است با:

$$\frac{\tilde{U} C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{k} \ln \left(E \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right) \quad (43-3)$$

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y_v}{\rho \kappa \sqrt{k}} \ln \left(\frac{y}{y_v} \right) + \frac{y - y_v}{\rho \kappa \sqrt{k}} + \frac{y^2}{\mu} \right] \quad (44-3)$$

و y_v ضخامت زیر لایه لزج فیزیکی می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2}} \quad (45-3)$$

$$y_v^* = 11.225 \text{ که}$$

تابع دیوار نامتعادل از مفهوم دو لایه در محاسبه مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در سلول های مجاور دیوار، که نیاز به حل معادله k در سلول های مجاور دیوار دارد، استفاده می کند. فرض می شود سلول های مجاور دیوار شامل زیر لایه لزج و لایه کاملاً آشفتگی باشند. برای تغییرات قائم کمیت های آشفتگی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

(۴۶-۳)

$$\tau_t = \begin{cases} 0, & y < y_v \\ \tau_w & y > y_v \end{cases} \quad k = \begin{cases} \left(\frac{y}{y_v}\right)^2 k_p, & y < y_v \\ k_p, & y > y_v \end{cases} \quad \varepsilon = \begin{cases} \frac{2\nu k}{y^2} & y < y_v \\ \frac{k^{3/2}}{C_l y} & y > y_v \end{cases}$$

که $C_l = \kappa C_\mu^{-3/4}$ و y_v ضخامت ابعادی زیر لایه لزج است، که در معادله ۳-۴۵ تعریف شده است. با استفاده از این تغییرات قائم، متوسط تولید سلول k و $\overline{G_k}$ و متوسط میزان اتلاف سلول $\overline{\varepsilon}$ قابل محاسبه بوسیله متوسط حجمی G_k و ε در سلول های مجاور دیوار می باشد. برای سلول های چهارضلعی و شش سطحی که حجم متوسط قابل تخمین زدن بوسیله عمق متوسط است، داریم:

$$\overline{G_k} \equiv \frac{1}{y_n} \int_0^{y_n} \tau_t \frac{\partial U}{\partial y} dy = \frac{1}{\kappa y_n} \frac{\tau_w^2}{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}} \ln\left(\frac{y_n}{y_v}\right) \quad (۴۷-۳)$$

و

$$\overline{\varepsilon} \equiv \frac{1}{y_n} \int_0^{y_n} \varepsilon dy = \frac{1}{y_n} \left[\frac{2\nu}{y_v} + \frac{k_p^{1/2}}{C_l^*} \ln\left(\frac{y_n}{y_v}\right) \right] k_p \quad (۴۸-۳)$$

که y_n ارتفاع سلول ($y_n = 2y_p$) می باشد. برای سلول های شکل های دیگر (مانند، مثلثی و شبکه های چهار ضلعی)، میانگین های حجم مناسب استفاده می شود.

در معادلات ۳-۴۷ و ۳-۴۸، مقدار انرژی جنبشی برای سلول های مجاور دیوار بطور موثر به نسبت های زیر لایه لزج و لایه کاملاً آشفته حساس می باشد، که بطور گسترده از سلولی به سلولی در جریانات غیر تعادلی تغییر می کند. که به طور موثر فرض تعادل محلی (تولید = افت) برقرار است که بوسیله تابع دیوار استاندارد در محاسبه مقدار انرژی جنبشی در سلول های مجاور دیوار پذیرفته می شود. بنابراین، توابع دیوار نامتعادل، تاحدی محاسبه برای اثرات غیر تعادلی در تابع استاندارد دیوار نادیده گرفته می شود.

۳-۶-۲-۵. توابع دیوار استاندارد در برابر توابع دیوار نامتعادل

توابع دیوار نامتعادل، به علت توانایی که در اثر دادن گرادیان های فشار و انحراف از تعادل دارند، برای جریان های پیچیده ای نظیر جداشدگی و به هم پیوستگی و جریان هایی با گرادیان های شدید فشار، مناسب می باشند. در چنین جریاناتی، بویژه برای تنش برشی دیوار (ضریب اصطکاکی سطح) و انتقال حرارت (عدد استنتن^۱ و ناسلت^۲) می توان عملکرد را بهبود داد.

۳-۶-۲-۶. محدودیت های روش تابع دیوار

در توابع دیوار استاندارد برای بیشتر اعداد رینولدز بزرگ، جریانات مجاور دیوار را با دقت منطقی پیش بینی می کنند. توابع دیوار نامتعادل با در نظر گرفتن اثرات گرادیان فشار می توانند عملکرد توابع دیوار را بهبود دهند. بهر حال، هر گاه شرایط نسبت به شرایط ایده‌الی که توابع دیوار برای آن بدست آمده‌اند، تغییر یابند، اطمینان این روابط کاهش می‌یابد. بعنوان نمونه موارد زیر عملکرد توابع دیوار را نامساعد می نمایند:

- ✓ اعداد رینولدز پایین یا اثرات نزدیک دیوار (مانند جریان از طریق یک شکاف کوچک یا لزجت زیاد، جریان سیال لزجت کم).
- ✓ نفوذ گسترده از دیوار (دمیدن / مکش).
- ✓ گرادیان های شدید فشار که منجر به جداشدگی لایه مرزی می شود.
- ✓ نیروهای حجمی قوی (مانند جریان نزدیک دیسکهای چرخشی، جریانات شناور - رانده شده).
- ✓ جریاناتی که در نزدیکی دیوار شدیداً سه بعدی هستند (مانند جریان حلزون^۳، لایه های مرزی سه بعدی مورب شدید).

^۱ Stanton Number

^۲ Nusselt Number

^۳ Ekman

اگر در جریانی که مدل سازی می شود یکی از موارد بالا بصورت قوی موجود باشد، باید این روش ها با یک مش به اندازه کافی ریز در نزدیک دیوار همراه شود. فلونت برای چنین مواردی، رفتار دیوار بهبود یافته را ایجاد کرده است. این روش برای سه مدل $k-\epsilon$ استفاده می شود.

**فصل چهارم: مقایسه نتایج
آزمایشگاهی و عددی ضریب افت
جریان در ورودی زیرگذرها**

۴-۱. مقدمه

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در دهه های اخیر ضرورت فراوانی پیدا کرده است. بطوریکه بسیاری از محققین به استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش بینی جریان های سیال توجه خاص پیدا کرده اند. در واقع با انجام کارهای آزمایشگاهی و استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و سپس مقایسه آن می توان از صحت نتایج دینامیک سیالات محاسباتی اطمینان حاصل کرد و به جای انجام تحقیقات آزمایشگاهی که موجب صرف هزینه و وقت زیاد می شود می توان با استفاده دینامیک سیالات محاسباتی به نتایج مشابه رسید.

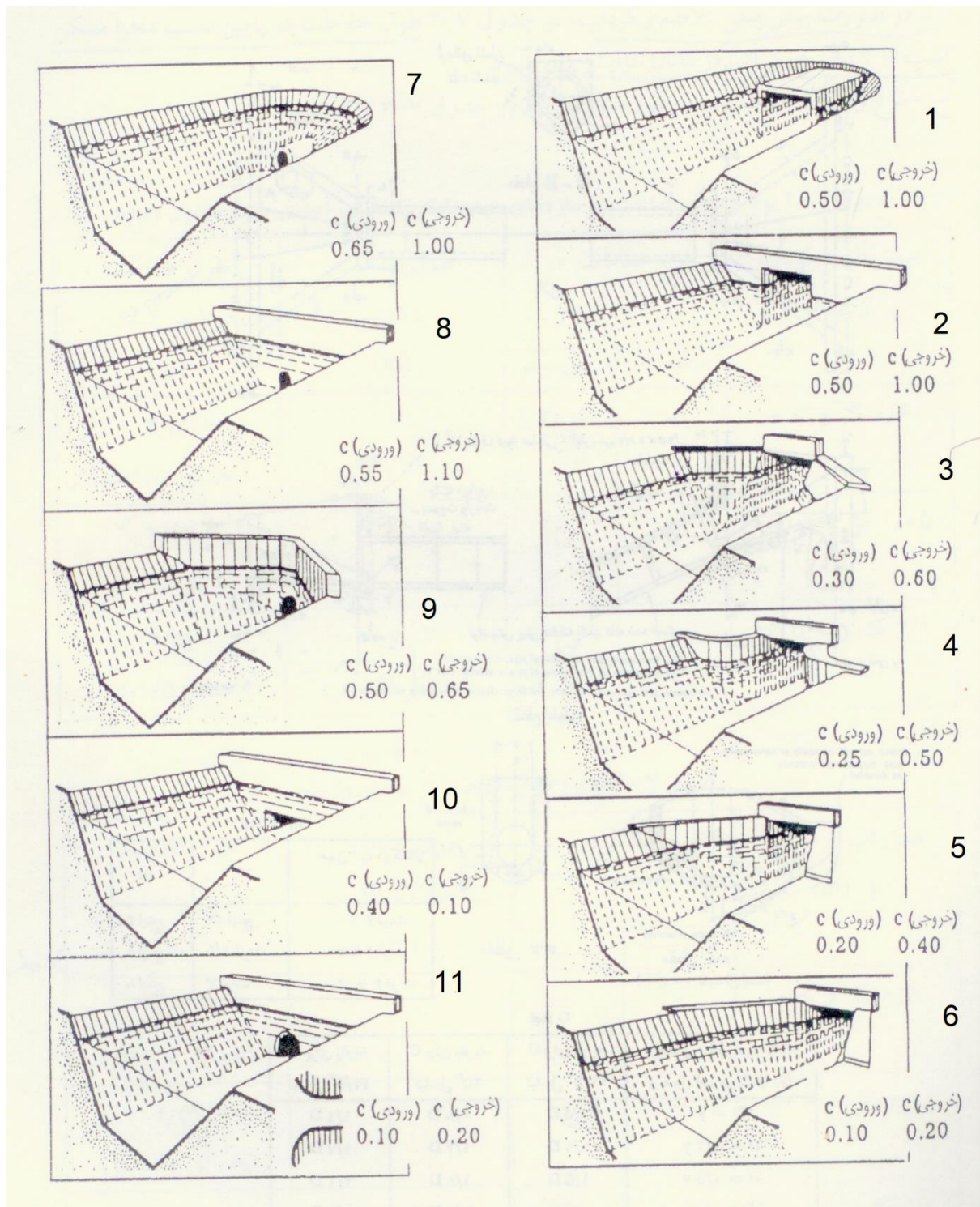
در این فصل نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی ضریب افت زیر گذر بررسی شده است. با مقایسه نتایج در آزمایشگاه و مدل عددی نرم افزار فلونت می توان مناسب ترین مدل آشفتگی جهت مدل سازی عددی زیرگذرها را تعیین کرد و همچنین مدل سازی کالورت با فلونت را جایگزینی برای کارهای آزمایشگاهی دانست.

۴-۲. نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی که در این تحقیق از آن استفاده شده است در شکل های زیر مشاهده می شود. در شکل ۴-۱ ضریب افت ورودی و خروجی زیرگذر نشان داده شده است که اندازه زیرگذر، سرعت و دبی

در مقدار ضریب افت موضعی کالورت را بی تاثیر نشان می دهد و تنها شکل و نوع دهانه ورودی و خروجی تبدیل زیرگذر بر ضریب افت موضعی اثر می گذارد.

در ابتدا زیر گذر به صورت باکس به بعد ۱۰ سانتی متر با دهانه ساده را در نرم افزار فلونت شبیه سازی کرده، و پس از آن به مقایسه نتایج حاصل از روش های مختلف آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی خواهیم پرداخت.



شکل ۴-۱- ضریب افت های موضعی ورودی و خروجی در تبدیل ها

۳-۴. شرایط ورودی مسئله

شرایط ورودی اعم از ابعاد و شکل مسئله، خصوصیات سیال، شرایط مرزی دیوار، فشار ورودی و خروجی، شتاب جاذبه، سرعت ورودی، معیار همگرایی و شدت آشفتگی می باشد که باید به صورت دقیق و متناسب شرایط آزمایشگاهی در مدل عددی اعمال شود.

۱-۳-۴. ابعاد زیرگذر

با توجه به اینکه ضریب افت عددی بی بعد است و همچنین مطابق با شکل نسبت به ابعاد مختلف ثابت در نظر گرفته شده است. در این پژوهش برای کالورت های جعبه ای مربعی ابعاد ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ سانتی متر و برای کالورت های لوله ای با قطر ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ در نظر گرفته شده است.

۲-۳-۴. خصوصیات سیال

سیال مورد آزمایش آب است که مقادیر چگالی و ویسکوزیته آن به صورت زیر می باشد.

$$\mu = 0.001003 \frac{kg}{m.sec} \quad , \quad \rho = 998.2 \frac{kg}{m^3}$$

۳-۳-۴. سرعت ورودی

سرعت ورودی را می توان با استفاده از معادله عدد رینولدز با توجه به قطر هیدرولیکی زیرگذر و عدد رینولدز در نظر گرفته شده برای شبیه سازی به دست آورد.

$$Re = \frac{\rho V_{in} D}{\mu} \rightarrow V_{in} = \frac{Re \mu}{\rho D}$$

که با جایگذاری مقادیر مربوط در فرمول بالا سرعت ورودی به دست می آید.

برای رینولدز ۲۰۰۰۰۰:

$$V_{in} = \frac{200000 \times 0.001003}{998.2 \times 0.1} = 2$$

۴-۳-۴. شرایط مرزی دیوار

دیوار زیرگذر ثابت و بدون حرکت است. سرعت روی دیوار برابر صفر در نظر گرفته می شود و شرط عدم لغزش استفاده می گردد.

۴-۳-۵. شتاب جاذبه

شتاب جاذبه برابر است با:

$$g=9.81\text{m/s}^2$$

۴-۳-۶. فشار خروجی

مقدار فشار در مرز خروجی برابر صفر و واحد آن پاسکال می باشد. این شرایط معادل با آن است که فشار به صورت نسبی در نظر گرفته شده و آب در حال تخلیه به اتمسفر می باشد.

۴-۳-۷. معیار همگرایی

معیار همگرایی برای رسیدن به جواب برابر $10^{-6} * 1$ می باشد که دارای دقت مناسبی خواهد بود. این مقدار مطلق (چنانچه قدر مطلق تفاوت مقادیر یک پارامتر در دو تکرار متوالی کمتر از مقدار مطلق ارائه شده به برنامه باشد، آن پارامتر همگرا شده در نظر گرفته می شود.) می باشد. با توجه به روش آشفتگی بر روی سرعت ها، تنش ها و غیره می تواند اعمال شود.

۴-۳-۸. شدت آشفتگی

شدت آشفتگی (I) نسبت ریشه دوم میانگین حسابی نوسانات سرعت (u') به سرعت جریان متوسط (u_{avg}) می باشد. به طور کلی شدت آشفتگی ۱ درصد را به عنوان شدت آشفتگی کم و بیشتر از ۱۰ درصد را به عنوان شدت آشفتگی بزرگ در نظر می گیرند [۲۷]. شدت آشفتگی را می توان با توجه به رابطه تجربی زیر تعیین نمود [۲۷]:

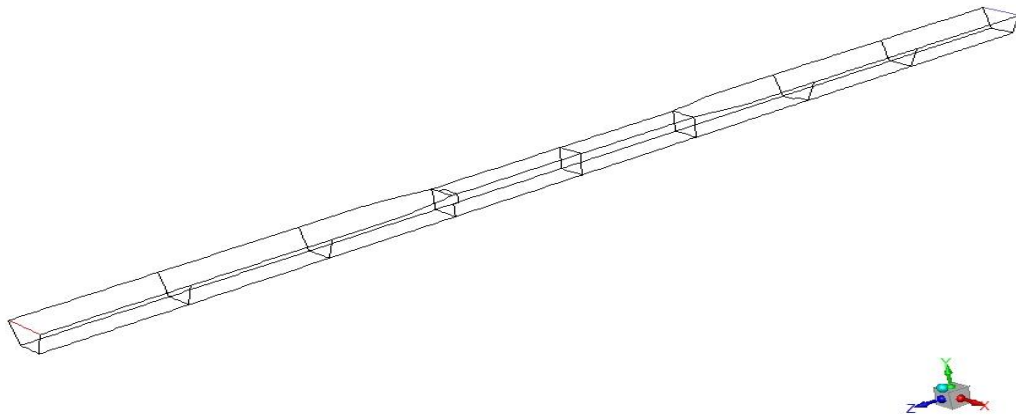
$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re_d)^{-1/8} \quad (1-4)$$

برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰۰ شدت آشفتگی بصورت زیر تعیین می شود:

$$I = 100 \times 0.16(200000)^{-1/8} = 3.48\%$$

۴-۴. مدل سازی هندسه

برای شروع یک نرم افزار CFD لازم است تا مدل مورد نظر توسط یک نرم افزار مدل سازی ابتدا طراحی شود. نرم افزارهای مختلفی چون CAD ، CATIA ، SOLID WORK و GAMBIT از پرکاربردترین نرم افزارهای مدل سازی می باشند که در دو حالت دو بعدی و سه بعدی می توان از آن ها بهره کافی برد. مدل سازی در این تحقیق به صورت سه بعدی و در محیط گمبیت انجام شده است.



شکل ۴-۲ زیرگذر نوع D=۱۰cm.۵

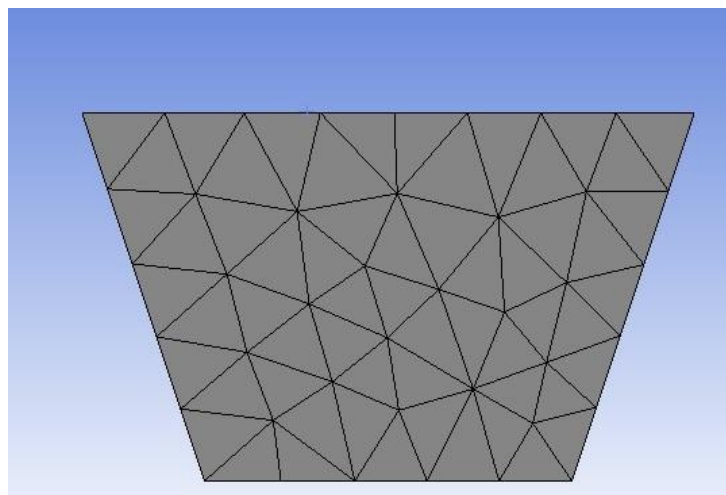
۴-۴. تولید شبکه مناسب

۴-۴-۱. نوع شبکه بندی

نوع شبکه بندی یکی از پارامترهای مهم است که با انتخاب صحیح آن می توان به نتایج مناسبی رسید. در این تحقیق از مدل tetrahedrons در نرم افزار icem cfd استفاده شده است. در این مدل ابتدا با وجود شبکه بندی در دو سطح از ابتدا و انتهای یک حجم و سپس با جارو کردن آن در تمامی حجم، شبکه ایجاد می شود.

۴-۴-۲. اندازه شبکه بندی

با انتخاب صحیح اندازه شبکه بندی علاوه بر آنکه می توان به نتایج مناسبی رسید می توان سرعت حل مسئله را نیز کاهش داد. انتخاب شبکه بندی بزرگ باعث جواب های نادرست می شود و با انتخاب شبکه های کوچک زمان حل مسئله افزایش می یابد. شکل ۳-۴ نمونه ای از شبکه بندی بوجود آمده در سطح مقطع کانال با عرض و ارتفاع ۱۰ سانتی متر را نشان می دهد.



شکل ۳-۴- شبکه بندی مقطع ورودی کانال

۴-۵. مدل سازی زیرگذر و کانال

برای اینکه هنگام ورود جریان به تبدیل ورودی زیرگذر پروفیل سرعت شکل مناسب خود را داشته باشد. برای ایجاد پروفیل مناسب قبل از کالورت کانال مستقیمی در نظر گرفته تا پروفیل سرعت شکل مناسب به خود را بگیرد [۲۸]. طول کانال ۱۰ متر قبل و بعد از زیرگذر در نظر گرفته می شود تا پروفیل سرعت به مقدار پایدار برسد.

۴-۶. ضریب افت

عبور جریان سیال در ورودی کالورت همراه با افت انرژی می باشد که افت های موضعی یا محلی نامیده می شود، که برای این افت ها ضریب افت انرژی که مقداری بی بعد است تعریف شده است.

برای محاسبه ضریب افت ورودی و خروجی به تفکیک از معادله برنولی استفاده می شود، در این حالت برای بدست آوردن ضریب افت ورودی دو نقطه یکی قبل از تبدیل، در کانال و دیگری بعد از تبدیل، در کالورت قرار می گیرد که اختلاف فشار در قبل و بعد از تبدیل، از نرم افزار استخراج می شود. جهت انجام این کار دو نقطه یکی ۱۰ سانتی متر قبل از شروع تبدیل و دیگری ۵۰ سانتی متر بعد از تبدیل در نظر گرفته می شود.

می توان معادله برنولی را برای دو نقطه ۱ و ۲ به صورت زیر نوشت:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (۲-۴)$$

که h_f برابر است با:

$$h_f = k \frac{V_2^2}{2g} \quad (۳-۴)$$

با توجه به افقی بودن مدل، معادله را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + k \frac{V_2^2}{2g} \quad (۴-۴)$$

۷-۴. مقایسه نتایج عددی انواع مدل های آشفته با نتایج آزمایشگاهی

مدل های آشفته بکار برده شده در این تحقیق انواع مدل های K-E و انواع مدل های K- ω می باشد که با مقایسه جواب های به دست آمده و جواب های آزمایشگاهی می توان بهترین روش برای مدل سازی جریان آشفته در زیرگذر جریان آب را انتخاب کرد.

مدل سازی های انجام گرفته برای کالورت های باکس مربعی به بعد ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و دایره ای به قطر ۲، ۵، ۷، ۱۰ سانتی متر صورت می گیرد. برای محاسبه درصد خطا از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{نتایج آزمایشگاهی} - \text{نتایج عددی}}{\text{نتایج آزمایشگاهی}} \times 100$$

در جداول ۱-۴ تا ۲۲-۴ ضریب افت تبدیل و درصد خطا نشان داده شده است، کمترین درصد خطا مناسب ترین مدل آشفته را مشخص می کند.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۱ از نوع مدل های باکس با ورودی تیز گوشه در جدول ۴-۱ نمایش داده شده است. در این مدل جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. چهار مدل زیرگذر با ابعاد متفاوت از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۱- ضریب افت زیرگذر باکس با ورودی تیز گوشه (۱)

	a بعد cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	sst
ورودی	10	0.527	0.52	0.512	0.528	0.475
	5	0.527	0.52	0.512	0.528	0.475
	15	0.527	0.52	0.512	0.528	0.475
	20	0.527	0.52	0.512	0.528	0.475
خروجی	10	1.082	1.065	1.04	1.094	0.933
	5	1.082	1.065	1.04	1.094	0.933
	15	1.082	1.065	1.04	1.094	0.933
	20	1.082	1.065	1.04	1.094	0.933

نتایج بدست آمده در جریان ورودی برای تمام بعد های ارائه شده مقادیر نسبتا ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر 0.527 است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر 0.52 است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر 0.512 می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با 0.528 است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر 0.475 می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با 1.082 است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با 1.065 و برای پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برابر 1.04 در جریان خروجی می باشد. مقدار

پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $1/0.94$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با 0.933 است.

مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

با بررسی درصد خطا بدست آمده از مدل شماره ۱ در جدول ۲-۴ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\epsilon$ و $k-\omega$ نتایجی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی دارند. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\epsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد.

جدول ۲-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با ورودی تیز گوشه (۱)

	بعد a cm	مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	Standard	Sst
ورودی	10	5.4	4	2.4	5.6	-5
	5	5.4	4	2.4	5.6	-5
	15	5.4	4	2.4	5.6	-5
	20	5.4	4	2.4	5.6	-5
خروجی	10	8.2	6.5	4	9.4	-6.7
	5	8.2	6.5	4	9.4	-6.7
	15	8.2	6.5	4	9.4	-6.7
	20	8.2	6.5	4	9.4	-6.7

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر $5/4$ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $2/4$ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $5/6$ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر 5 می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا

پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $8/2$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $6/5$ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر 4 در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $9/4$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با $6/7$ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۲ از نوع مدل های باکس با دیواره عمود بر ورودی کالورت و از نوع تبدیل ساده می باشد در جدول ۳-۴ نمایش داده شده است. در این مدل جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. چهار مدل زیرگذر با ابعاد متفاوت از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است

جدول ۳-۴- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل دیواره عمود (۲)

	a بعد cm	مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	0.518	0.515	0.506	0.521	0.492
	5	0.518	0.515	0.506	0.521	0.492
	15	0.518	0.515	0.506	0.521	0.492
	20	0.518	0.515	0.506	0.521	0.492
خروجی	10	1.04	1.03	1.02	1.067	0.97
	5	1.04	1.03	1.02	1.067	0.97
	15	1.04	1.03	1.02	1.067	0.97
	20	1.04	1.03	1.02	1.067	0.97

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعد های ارائه شده مقادیر نسبتا ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر $0/518$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر با $0/515$ است. مقدار

ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $0/506$ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $0/521$ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر $0/492$ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $1/04$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $1/03$ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر $1/02$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $1/67$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با $0/97$ است.

همانند مدل شماره ۱ با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

با بررسی درصد خطا بدست آمده از مدل شماره ۲ در جدول ۴-۴ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\epsilon$ و $k-\omega$ نتایج نسبت به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است و درصد خطا بسیار کم می باشد. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\epsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد. در این مدل درصد خطا مدل آشفتگی $k-\omega$ sst در صد خطای متناسبی دارد.

جدول ۴-۴- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل دیواره عمود (۲)

	a بعد cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	3.6	3	1.2	4.2	-1.6
	5	3.6	3	1.2	4.2	-1.6
	15	3.6	3	1.2	4.2	-1.6
	20	3.6	3	1.2	4.2	-1.6
خروجی	10	4	3	2	6.7	-3
	5	4	3	2	6.7	-3
	15	4	3	2	6.7	-3
	20	4	3	2	6.7	-3

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر $3/6$ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر $1/2$ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $4/2$ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر $1/6$ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با 4 است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با 3 و برای پارامتر $k-\epsilon$ Realizable در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $6/7$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با 3 است.

با توجه به ساده بودن تبدیل در این مدل، مدلسازی عددی بهتر انجام گرفته و درصد خطا نسبت به مدل های دیگر کمتر می باشد.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۳ که از نوع مدل های باکس با تبدیل گوه ای با زاویه ۴۵ درجه در ورودی کالورت در جدول ۴-۵ نمایش داده شده است. در این مدل جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. چهار مدل زیرگذر با ابعاد متفاوت از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۵- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل گوه ای (۳)

	بعد a cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	0.36	0.35	0.33	0.36	0.245
	5	0.36	0.35	0.33	0.36	0.245
	15	0.36	0.35	0.33	0.36	0.245
	20	0.36	0.35	0.33	0.36	0.245
خروجی	10	0.67	0.66	0.64	0.7	0.53
	5	0.67	0.66	0.64	0.7	0.53
	15	0.67	0.66	0.64	0.7	0.53
	20	0.67	0.66	0.64	0.7	0.53

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعد های ارائه شده مقادیر نسبتا ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۰/۳۶ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۰/۳۵ است. مقدار

ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر 0.33 می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با 0.36 است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر 0.245 می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با 0.67 است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با 0.66 و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر 0.64 در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر 0.7 است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با 0.53 است.

همانند مدل شماره ۱ در مدل شماره ۳ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۳ در جدول ۴-۶ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های k- ϵ و $k-\omega$ با توجه به نوع تبدیل و زاویه دیواره با ورودی زیرگذر درصد خطا در تمامی مدل های آشفستگی کمی بیشتر می باشد اما قابل قبول است. کمترین درصد خطا مربوط به k- ϵ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به k- ω standard و k- ϵ standard می باشد.

جدول ۴-۶-درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل دیواره گوه ای (۳)

	بعد a cm	مدل آشفستگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	20	16.6666667	10	20	-18.3333333
	5	20	16.6666667	10	20	-18.3333333
	15	20	16.6666667	10	20	-18.3333333
	20	20	16.6666667	10	20	-18.3333333
خروجی	10	11.667	10.000	6.667	16.667	-11.667
	5	11.667	10.000	6.667	16.667	-11.667
	15	11.667	10.000	6.667	16.667	-11.667
	20	11.667	10.000	6.667	16.667	-11.667

مقدار درصد خطا پارامتر k- ϵ standard در جریان ورودی برابر ۲۰ است. برای پارامتر k- ϵ rng مقدار درصد خطا پارامتر k- ϵ Realizable برای جریان ورودی برابر ۱۰ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر k- ω standard در جریان ورودی برابر با ۲۰ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر k- ω sst برابر ۱۸/۳۳ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر k- ϵ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۱۱/۶۶۷ است. برای پارامتر k- ϵ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۱۰ و برای پارامتر k- ϵ Realizable برابر ۶/۶۷ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر k- ω standard در جریان خروجی برابر ۱۶/۶۶۷ است و برای k- ω sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با ۱۱/۶۶۷ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۴ که از تبدیل گرد گوشه با شعاع انحنای ثابت ۲ در ورودی کالورت جعبه ای استفاده شده است در جدول ۴-۷ نشان داده شده است. در این مدل، جریان به صورت پیر در نظر گرفته شده است. چهار مدل زیرگذر با ابعاد متفاوت از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\omega$ و $k-\epsilon$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۷- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل گرد گوشه (۴)

	a بعد cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	0.259	0.257	0.255	0.259	0.242
	5	0.259	0.257	0.255	0.259	0.242
	15	0.259	0.257	0.255	0.259	0.242
	20	0.259	0.257	0.255	0.259	0.242
خروجی	10	0.511	0.509	0.507	0.511	0.49
	5	0.511	0.509	0.507	0.511	0.49
	15	0.511	0.509	0.507	0.511	0.49
	20	0.511	0.509	0.507	0.511	0.49

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعد های ارائه شده مقادیر نسبتاً ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۰/۲۵۹ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۰/۲۵۷ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر ۰/۲۵۵ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با ۰/۲۵۹ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر ۰/۲۴۲ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۰/۵۱۱ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۰/۵۰۹ و برای پارامتر $k-\epsilon$

Realizable برابر ۰/۵۰۷ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر ۰/۵۱۱ است و برای $k-\omega$ Sst مقدار ضرایب افت برابر با ۰/۴۹ است.

همانند مدل شماره ۱ در مدل شماره ۴ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۴ در جدول ۴-۸ با توجه به در نظر گرفتن یک شعاع انحنا برای تبدیل ورودی و خروجی درصد خطاها کم و قابل قبول است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\epsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard و $k-\epsilon$ standard می باشد. در این مدل درصد خطا در خروجی کمتر از درصد خطای ورودی زیرگذر می باشد.

جدول ۴-۸-در صد خطا زیرگذر باکس با تبدیل گرد گوشه (۴)

	a بعد cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	3.6	2.8	2	3.6	-3.2
	5	3.6	2.8	2	3.6	-3.2
	15	3.6	2.8	2	3.6	-3.2
	20	3.6	2.8	2	3.6	-3.2
خروجی	10	2.2	1.8	1.4	2.2	-2
	5	2.2	1.8	1.4	2.2	-2
	15	2.2	1.8	1.4	2.2	-2
	20	2.2	1.8	1.4	2.2	-2

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۳/۶ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر ۲/۸ است. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر

۲ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $3/6$ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر $3/2$ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $2/2$ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $1/8$ و برای پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برابر $1/4$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $2/2$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با 2 است.

در جدول ۴-۹ ضرایب افت مربوط به مدل شماره ۵ که از تبدیل با دیواره مایل در ورودی کالورت جعبه ای استفاده شده است مشاهده می شود. در این مدل، جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. دیوار با زاویه 45° درجه نسبت به ورودی زیرگذر مدل شده است. چهار مدل زیرگذر با ابعاد متفاوت از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۹- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل مایل (۵)

	بعد a cm	مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	0.22	0.217	0.213	0.224	0.182
	5	0.22	0.217	0.213	0.224	0.182
	15	0.22	0.217	0.213	0.224	0.182
	20	0.22	0.217	0.213	0.224	0.182
خروجی	10	0.47	0.46	0.42	0.49	0.34
	5	0.47	0.46	0.42	0.49	0.34
	15	0.47	0.46	0.42	0.49	0.34
	20	0.47	0.46	0.42	0.49	0.34

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعد های ارائه شده مقادیر نسبتاً ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر $0/22$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر با $0/217$ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $0/213$ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $0/224$ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر $0/182$ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $0/47$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $0/46$ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر $0/42$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $0/49$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با $0/34$ است.

همانند مدل شماره ۱ در مدل شماره ۵ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

با مشاهده جدول ۴-۱۰ در مدل ۵ همانند دیگر مدل ها که در گذشته به آن پرداختیم مدل آشفته‌گی k-ε Realizable کمترین خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی را دارد. بیشترین درصد خطا مربوط به k-ω standard می باشد.

جدول ۴-۱۰- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل مایل (۵)

	بعد a cm	مدل آشفته‌گی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	10	8.5	6.5	12	-9
	5	10	8.5	6.5	12	-9
	15	10	8.5	6.5	12	-9
	20	10	8.5	6.5	12	-9
خروجی	10	17.5	15	5	22.5	-15
	5	17.5	15	5	22.5	-15
	15	17.5	15	5	22.5	-15
	20	17.5	15	5	22.5	-15

مقدار درصد خطا پارامتر k-ε standard در جریان ورودی برابر ۱۰ است. برای پارامتر k-ε rng در جریان ورودی برابر ۸/۵ است. مقدار درصد خطا پارامتر k-ε Realizable برای جریان ورودی برابر ۶/۵ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر k-ω standard در جریان ورودی برابر ۱۲ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر k-ω sst برابر ۹ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر k-ε standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۱۷/۵ است. برای پارامتر k-ε rng در خروجی زیر گذر برابر با ۱۵ و برای پارامتر k-ε Realizable برابر ۵ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر k-ω standard در جریان خروجی برابر ۲۲/۵ است و برای k-ω sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با ۱۵ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۶ که تبدیل با دیواره مایل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به ورودی زیرگذر مدلسازی شده در جدول ۴-۱۱ نمایش داده شده است. در این مدل، جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. چهار مدل زیرگذر با ابعاد متفاوت از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۱۱- ضریب افت زیرگذر باکس با تبدیل دیواره مایل (۶)

	بعد a cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	0.11	0.106	0.105	0.109	0.092
	5	0.11	0.106	0.105	0.109	0.092
	15	0.11	0.106	0.105	0.109	0.092
	20	0.11	0.106	0.105	0.109	0.092
خروجی	10	0.22	0.217	0.213	0.219	0.186
	5	0.22	0.217	0.213	0.219	0.186
	15	0.22	0.217	0.213	0.219	0.186
	20	0.22	0.217	0.213	0.219	0.186

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعد های ارائه شده مقادیر نسبتا ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۰/۱۱ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۰/۱۰۶ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر ۰/۱۰۵ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با ۰/۱۰۹ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر ۰/۰۹۲ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر

برابر با ۰/۲۲ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۰/۲۱۷ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر ۰/۲۱۳ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر ۰/۲۱۹ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با ۰/۱۸۶ است.

همانند مدل شماره ۱ در مدل شماره ۶ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۶ در جدول ۴-۱۲ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ با توجه به نوع تبدیل و زاویه دیواره با ورودی زیرگذر درصد خطا در تمامی مدل های آشفستگی مقادیر قابل قبولی است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\varepsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\varepsilon$ standard می باشد.

جدول ۴-۱۲- درصد خطا زیرگذر باکس با تبدیل دیواره مایل (۶)

	a بعد cm	مدل آشفستگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	10	10	6	5	9	-8
	5	10	6	5	9	-8
	15	10	6	5	9	-8
	20	10	6	5	9	-8
خروجی	10	10	8.5	6.5	9.5	-7
	5	10	8.5	6.5	9.5	-7
	15	10	8.5	6.5	9.5	-7
	20	10	8.5	6.5	9.5	-7

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۱۰ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۶ است. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر ۵ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با ۹ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر ۸ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۱۰ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۸/۵ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر ۶/۵ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر ۹/۵ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با ۷ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۷ که از تبدیل با دیواره عمود در ورودی کالورت لوله ای استفاده شده است در جدول ۴-۱۳ نمایش داده شده است. در این مدل، لوله به صورت روزنه در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب در بالادست جریان بالاتر از سطح ورودی زیر گذر می باشد. چهار مدل زیر گذر با اقطار متفاوت از ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۱۳- ضریب افت زیر گذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۷)

	قطر d cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	2.5	0.69	0.69	0.67	0.71	0.6
	5	0.69	0.69	0.67	0.71	0.6
	7.5	0.69	0.69	0.67	0.71	0.6
	10	0.69	0.69	0.67	0.71	0.6
خروجی	2.5	1.09	1.1	1.07	1.11	0.92
	5	1.09	1.1	1.07	1.11	0.92
	7.5	1.09	1.1	1.07	1.11	0.92
	10	1.09	1.1	1.07	1.11	0.92

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد در مدل لوله ای نیز نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعدهای ارائه شده مقادیر نسبتاً ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۰/۶۹ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۰/۶۹ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر ۰/۶۷ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با ۰/۷۱ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ Sst برابر ۰/۶ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی

زیرگذر برابر با ۱/۰۹ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۱/۱ و برای پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برابر ۱/۰۷ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر ۱/۱۱ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با ۰/۹۲ است.

در مدل شماره ۷ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی از ضرایب ورودی کالورت بیشتر می باشد اما ۲ مانند دیگر مدل ها که در بالا گفته شد ۲ برابر نیست که مطابق با نتایج آزمایشگاهی است. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۷ در جدول ۴-۱۴ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\epsilon$ و $k-\omega$ با توجه به نوع تبدیل و زاویه دیواره با ورودی زیرگذر درصد خطا در تمامی مدل های آشفستگی مقادیر قابل قبولی است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\epsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد.

جدول ۴-۱۴-درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۷)

	قطر d cm	مدل آشفستگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	2.5	6.154	6.154	3.077	9.231	-7.692
	5	6.154	6.154	3.077	9.231	-7.692
	7.5	6.154	6.154	3.077	9.231	-7.692
	10	6.154	6.154	3.077	9.231	-7.692
خروجی	2.5	9	10	7	11	-8
	5	9	10	7	11	-8
	7.5	9	10	7	11	-8
	10	9	10	7	11	-8

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۶/۱۵۴ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۶/۱۵۴ است. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی

برابر ۳/۰۷۷ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با ۹/۲۳۱ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر ۷/۶۹۲ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۹ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۱۰ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر ۷ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر ۱۱ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با ۸ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۸ که از تبدیل ساده با دیواره عمود بر ورودی کالورت لوله ای استفاده شده است در جدول ۴-۱۵ مشاهده می شود. در این مدل، جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. در این مدل، لوله به صورت روزنه در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب در بالادست جریان، بالاتر از سطح ورودی زیر گذر می باشد. چهار مدل زیرگذر با اقطار متفاوت از ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۱۵- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۸)

قطر d cm		مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
		ورودی	2.5	0.58	0.565	0.56
5	0.58		0.565	0.56	0.58	0.53
7.5	0.58		0.565	0.56	0.58	0.53
10	0.58		0.565	0.56	0.58	0.53
خروجی	2.5	1.18	1.15	1.13	1.19	1.03
	5	1.18	1.15	1.13	1.19	1.03
	7.5	1.18	1.15	1.13	1.19	1.03
	10	1.18	1.15	1.13	1.19	1.03

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد در مدل لوله ای نیز نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعدهای ارائه شده مقادیر نسبتاً ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر $0/58$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر با $0/565$ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $0/56$ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $0/58$ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر $0/53$ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $1/18$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $1/15$ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر $1/13$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $1/19$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با $1/03$ است.

همانند مدل شماره ۱ در مدل شماره ۸ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۸ در جدول ۴-۱۶ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ با توجه به ساده بودن نوع تبدیل در صد خطا کم است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\varepsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد.

جدول ۴-۱۶-درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود(۸)

	قطر d cm	مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	2.5	5.455	2.727	1.818	5.455	-3.636
	5	5.455	2.727	1.818	5.455	-3.636
	7.5	5.455	2.727	1.818	5.455	-3.636
	10	5.455	2.727	1.818	5.455	-3.636
خروجی	2.5	7.273	4.545	2.727	8.182	-6.364
	5	7.273	4.545	2.727	8.182	-6.364
	7.5	7.273	4.545	2.727	8.182	-6.364
	10	7.273	4.545	2.727	8.182	-6.364

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر $5/455$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $2/727$ است. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر $5/455$ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر $3/636$ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $7/273$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $4/545$ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر $2/727$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $8/182$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با $6/364$ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۹ که از تبدیل با دیواره مایل نسبت به ورودی کالورت لوله ای استفاده شده است در جدول ۴-۱۷ نمایش داده شده است. در این مدل، جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. در این مدل، لوله به صورت روزنه در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب در بالادست جریان، بالاتر از سطح ورودی زیر گذر می باشد. چهار مدل زیرگذر با اقطار متفاوت از ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدل سازی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۱۷- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیوار مایل (۹)

	قطر d cm	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	2.5	0.518	0.515	0.512	0.53	0.484
	5	0.518	0.515	0.512	0.53	0.484
	7.5	0.518	0.515	0.512	0.53	0.484
	10	0.518	0.515	0.512	0.53	0.484
خروجی	2.5	0.71	0.683	0.671	0.72	0.61
	5	0.71	0.683	0.671	0.72	0.61
	7.5	0.71	0.683	0.671	0.72	0.61
	10	0.71	0.683	0.671	0.72	0.61

همان طور که در مدل های گذشته به آن اشاره شد در مدل لوله ای نیز نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعدهای ارائه شده مقادیر نسبتا ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۰/۵۱۸ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۰/۵۱۵ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر ۰/۵۱۲ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با ۰/۵۳ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر ۰/۴۸۴ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۰/۷۱ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۰/۶۸۳

و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر 0.671 در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر 0.72 است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با 0.61 است. ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۹ در جدول ۴-۱۸ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ در صد خطا قابل قبول است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\varepsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد.

جدول ۴-۱۸- درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیوار مایل (۹)

	قطر d cm	مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	2.5	3.6	3	2.4	6	-3.2
	5	3.6	3	2.4	6	-3.2
	7.5	3.6	3	2.4	6	-3.2
	10	3.6	3	2.4	6	-3.2
خروجی	2.5	9.231	5.077	3.231	10.769	-6.154
	5	9.231	5.077	3.231	10.769	-6.154
	7.5	9.231	5.077	3.231	10.769	-6.154
	10	9.231	5.077	3.231	10.769	-6.154

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر $3/6$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر $2/4$ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با 3 است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر $3/2$ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $9/231$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر

گذر برابر با ۵/۰۷۷ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر ۳/۲۳۱ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر ۱۰/۷۶۹ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با ۶/۱۵۴ است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۱۰ که از تبدیل ساده با دیواره عمود نسبت به ورودی کالورت مستطیلی استفاده شده است در جدول ۴-۱۹ نمایش داده شده است. در این مدل، جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. در این مدل، لوله به صورت روزنه در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب در بالادست جریان، بالاتر از سطح ورودی زیر گذر می باشد. چهار مدل زیرگذر با عرض های متفاوت از ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با ۲۰۰۰۰۰ ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۱۹- ضریب افت زیرگذر مستطیلی با تبدیل دیوار عمود (۱۰)

سطح مقطع	مدل آشفتگی					
	$k-\varepsilon$			$k-\omega$		
	standard	rng	realizable	standard	sst	
ورودی	A	0.421	0.419	0.413	0.423	0.38
	0.5A	0.421	0.419	0.413	0.423	0.38
	1.5A	0.421	0.419	0.413	0.423	0.38
	2A	0.421	0.419	0.413	0.423	0.38
خروجی	A	0.125	0.12	0.11	0.131	0.078
	0.5A	0.125	0.12	0.11	0.131	0.078
	1.5A	0.125	0.12	0.11	0.131	0.078
	2A	0.125	0.12	0.11	0.131	0.078

در مدل مستطیلی مانند مدل های باکس و لوله ای نیز نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعدهای ارائه شده مقادیر نسبتا ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۰/۴۲۱ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر با ۰/۴۱۹

است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $0/413$ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $0/423$ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر $0/38$ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $0/125$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $0/12$ و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر $0/11$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $0/131$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با $0/078$ است.

در این مدل با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی کمتر از ضرایب ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۱۰ در جدول ۴-۲۰ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ در صد خطا قابل قبول است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\varepsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد.

جدول ۴-۲۰-درصد خطا زیرگذر مستطیلی با تبدیل دیوار عمود (۱۰)

سطح مقطع		مدل آشفتگی				
		$k-\varepsilon$			$k-\omega$	
		standard	rng	realizable	standard	sst
ورودی	A	5.25	4.75	3.25	5.75	-5
	0.5A	5.25	4.75	3.25	5.75	-5
	1.5A	5.25	4.75	3.25	5.75	-5
	2A	5.25	4.75	3.25	5.75	-5
خروجی	A	25	20	10	31	-22
	0.5A	25	20	10	31	-22
	1.5A	25	20	10	31	-22
	2A	25	20	10	31	-22

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان ورودی برابر $5/25$ است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در جریان ورودی برابر با $4/75$ است. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $3/25$ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $5/75$ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر 5 می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\varepsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با 25 است. برای پارامتر $k-\varepsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با 20 و برای پارامتر $k-\varepsilon$ Realizable برابر 10 در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر 31 است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با 22 است.

ضریب افت مربوط به مدل شماره ۱۱ که از تبدیل با دیواره عمود نسبت به ورودی کالورت لوله ای استفاده شده است در جدول ۴-۲۱ نمایش داده شده است. در این مدل، جریان به صورت پر در نظر گرفته شده است. در این مدل، لوله به صورت روزنه در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب در بالادست جریان، بالاتر از سطح ورودی زیر گذر می باشد. چهار مدل زیرگذر با اقطار متفاوت از $2/5$ ، 5 ، $7/5$ ، 10 بر حسب سانتی متر و با فرض عدد رینولدز برابر با 200000 ایجاد شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای نتایج مدلسازی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ برای پارامتر ورودی و خروجی جریان ارائه شده است.

جدول ۴-۲۱- ضریب افت زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۱۱)

	قطر d	مدل آشفتگی				
		k-ε			k-ω	
		standard	rng	realizable	Standard	Sst
ورودی	2.5	0.121	0.116	0.11	0.135	0.079
	5	0.121	0.116	0.11	0.135	0.079
	7.5	0.121	0.116	0.11	0.135	0.079
	10	0.121	0.116	0.11	0.135	0.079
خروجی	2.5	0.227	0.22	0.217	0.231	0.174
	5	0.227	0.22	0.217	0.231	0.174
	7.5	0.227	0.22	0.217	0.231	0.174
	10	0.227	0.22	0.217	0.231	0.174

همان طور که در مدل شماره ۱ به آن اشاره شد در مدل لوله ای نیز نتایج بدست آمده در جریان ورودی و خروجی برای تمام بعدهای ارائه شده مقادیر نسبتاً ثابتی داشته است. بر این اساس مقدار پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر $0/121$ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در جریان ورودی برابر با $0/116$ است. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر $0/11$ می باشد. مقدار ضریب افت پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر با $0/135$ است. همچنین مقدار پارامتر $k-\omega$ sst برابر $0/079$ می باشد. به همین صورت مقدار ضریب افت پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با $0/227$ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با $0/22$ و برای پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برابر $0/217$ در جریان خروجی می باشد. مقدار پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $0/231$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار ضریب افت برابر با $0/174$ است.

همانند مدل شماره ۱ در مدل شماره ۱۱ هم با مقایسه نتایج ضرایب افت در مدلسازی عددی مشخص می شود که ضرایب خروجی تقریباً دو برابر ضرایب در ورودی کالورت می باشد که این با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین ثابت بودن ضرایب به دست آمده در ابعاد مختلف در ورودی و خروجی زیرگذر نشان از آن دارد که ضرایب افت از بعد مستقل می باشد.

در مدل شماره ۱۱ در جدول ۴-۲۲ مشاهده می شود که ضریب افت بدست آمده در تمامی مدل های $k-\epsilon$ و $k-\omega$ در صد خطا قابل قبول است. کمترین درصد خطا مربوط به $k-\epsilon$ Realizable و بیشترین درصد خطا مربوط به $k-\omega$ standard می باشد.

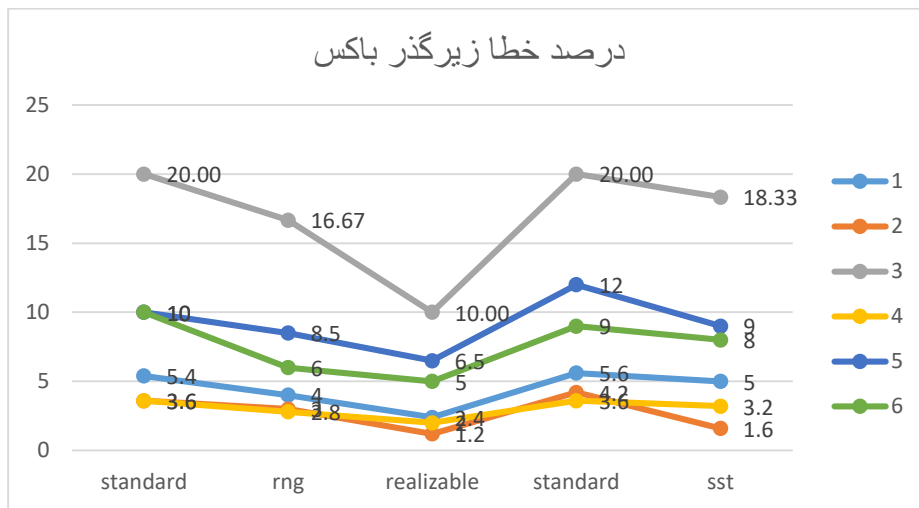
جدول ۴-۲۲-درصد خطا زیرگذر لوله ای با تبدیل دیواره عمود (۱۱)

	قطر d	مدل آشفتگی				
		k- ϵ			k- ω	
		standard	rng	realizable	standard	Sst
ورودی	2.5	21	16	10	35	-21
	5	21	16	10	35	-21
	7.5	21	16	10	35	-21
	10	21	16	10	35	-21
خروجی	2.5	13.5	10	8.5	15.5	-13
	5	13.5	10	8.5	15.5	-13
	7.5	13.5	10	8.5	15.5	-13
	10	13.5	10	8.5	15.5	-13

مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۲۱ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان ورودی برابر ۱۶ است. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برای جریان ورودی برابر ۱۰ می باشد. مقدار درصد خطا پارامتر $k-\omega$ standard در جریان ورودی برابر ۳۵ است. همچنین مقدار قدر مطلق درصد خطا پارامتر $k-\omega$ sst برابر ۲۱ می باشد. به همین صورت مقدار درصد خطا پارامتر $k-\epsilon$ standard در جریان خروجی زیرگذر برابر با ۱۳/۵ است. برای پارامتر $k-\epsilon$ rng در خروجی زیر گذر برابر با ۱۰ و برای پارامتر $k-\epsilon$ Realizable برابر ۸/۵ در جریان خروجی می باشد. مقدار

پارامتر $k-\omega$ standard در جریان خروجی برابر $15/5$ است و برای $k-\omega$ sst مقدار قدر مطلق درصد خطا برابر با 13 است.

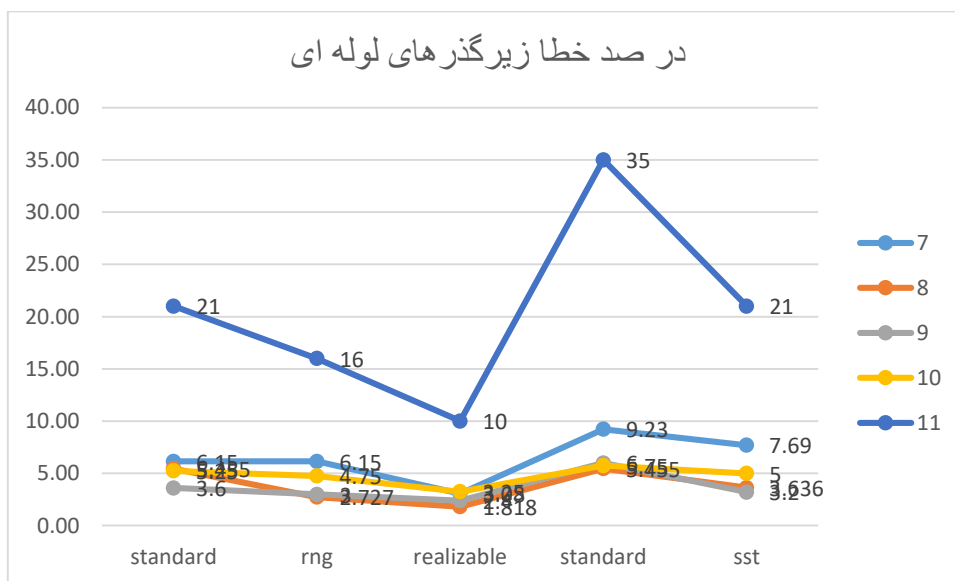
برای مقایسه بهتر نتایج مدل سازی، برای 6 مدل زیرگذرهای باکس نمودار قدر مطلق درصد خطا به صورت خطی در شکل $4-4$ نمایش داده شده است. نمودار افقی نمایشگر مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ standard, $k-\epsilon$ rng, $k-\epsilon$ Realizable, $k-\omega$ standard و $k-\omega$ sst است و نمودار عمودی مقادیر درصد خطا را نشان می دهد.



شکل $4-4$ - نمودار درصد خطا در ورودی زیرگذرهای باکس

نمودار مربوط به درصد خطا در کالورت های جعبه ای در شکل $4-4$ نمایش داده شده است. به طور مشخص بیشترین درصد خطا مربوط به مدل شماره 3 در حالت $k-\omega$ standard و $k-\epsilon$ standard به مقدار درصد خطا 20 می باشد. و کمترین درصد خطا مربوط به مدل شماره 2 در حالت $k-\epsilon$ Realizable به مقدار $1/2$ است. همچنین بیشترین نرخ تغییرات در مدل شماره 3 اتفاق می افتد.

برای مقایسه بهتر نتایج مدل سازی، برای ۵ مدل زیرگذرهای لوله ای و مستطیلی نمودار قدر مطلق درصد خطا به صورت خطی در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. نمودار افقی نمایشگر مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ standard، $k-\epsilon$ rng، $k-\epsilon$ Realizable، $k-\omega$ standard و $k-\omega$ sst است و نمودار عمودی مقادیر درصد خطا را نشان می دهد.



شکل ۴-۵- نمودار درصد خطا در ورودی زیرگذرهای لوله ای

نمودار مربوط به درصد خطا در کالورت های لوله ای و مستطیلی در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. به طور مشخص بیشترین درصد خطا مربوط به مدل شماره ۱۱ در حالت $k-\omega$ standard به مقدار ۳۵ می باشد. و کمترین درصد خطا مربوط به مدل شماره ۸ در حالت $k-\epsilon$ Realizable به مقدار ۱/۸۱۸ است. همچنین بیشترین نرخ تغییرات در مدل شماره ۱۱ اتفاق می افتد.

مشخص می شود که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ Realizable در تمام زیرگذرها نتایج مناسب تری را به دست می دهد.

۸-۴. بررسی انواع الگوریتم های حل توام سرعت و فشار

برای مقایسه الگوریتم های حل توام سرعت و فشار زیرگذر باکس با تبدیل نوع ۲ با قطر ۱۰ سانتی متر، با روش آشفتگی Realizable مدل می شود. نتایج در جدول ۴-۲۳ مشاهده می شود.

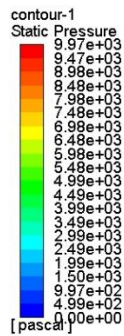
جدول ۴-۲۳- مقایسه الگوریتم های حل توام سرعت - فشار

		تعداد گام همگرایی	مقدار افت
نوع الگوریتم حل توام سرعت و فشار	Simple	۱۱۱۰	۰/۵۰۶
	simplec	۱۱۷۶	۰,۵۰۶
	coupled	۱۳۶۵	۰,۵۰۶

با توجه به جدول ۴-۲۳ می توان دریافت که الگوریتم های حل توام سرعت - فشار هیچگونه تاثیری در جواب ندارند. تنها تفاوت آن ها در تعداد گام های همگرایی می باشد.

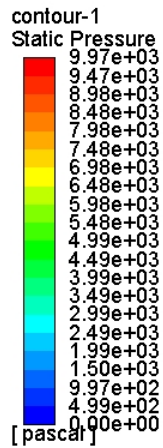
۹-۴. بررسی فشار و سرعت ابتدا و انتهای تبدیل

دلیل اصلی به وجود آمدن افت در ورودی زیرگذر به علت اختلاف فشاری که در قبل ورودی تبدیل و بعد از آن ایجاد می شود است. از این رو برای درک تغییرات افت نیاز به بررسی مقادیر فشار در ورودی تبدیل، وسط تبدیل و انتهای تبدیل می باشد. در ادامه در شکل های ۴-۶-الف، ۴-۶-ب و ۴-۶-ج این مقاطع با پراکنش دو بعدی فشار بر حسب پاسکال نمایش داده شده است.



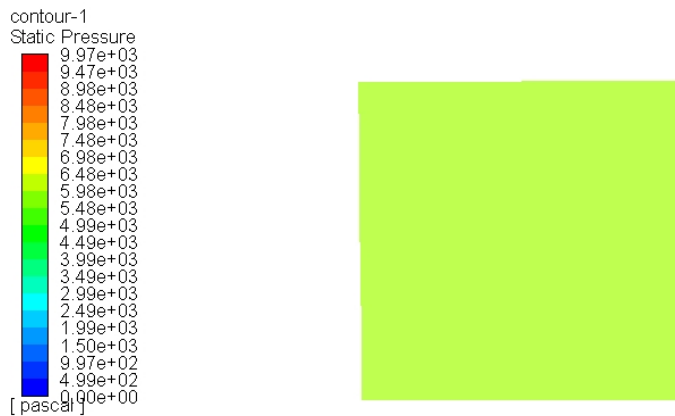
شکل ۴-۶-الف مقدار فشار قبل از ورودی تبدیل

در شکل ۴-۶-الف مقدار فشار ورودی تبدیل نشان داده شده است که مقدار آن به صورت تقریبی برابر $10^3 * 7/48$ می باشد، فشار در تمام مقطع ثابت است.



شکل ۴-۶-ب مقدار فشار در وسط تبدیل

در شکل ۴-۶-ب مقدار فشار وسط تبدیل نشان داده شده است که مقدار آن به صورت تقریبی برابر $10^3 * 6/98$ می باشد، فشار در تمام مقطع ثابت است.



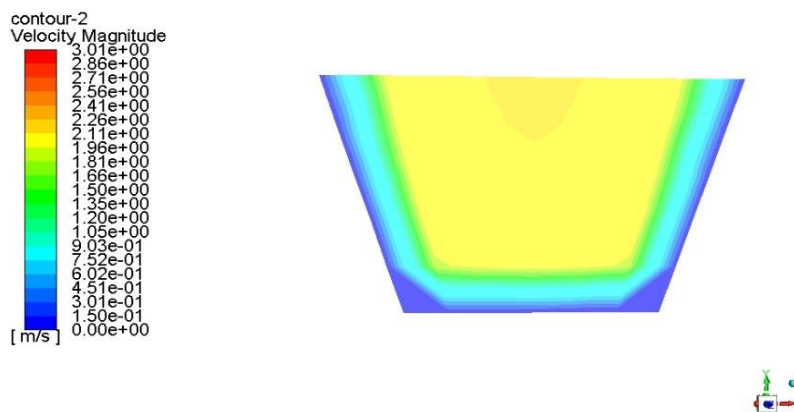
شکل ۴-۶-ج مقدار فشار در انتهای تبدیل و ورودی کالورت

شکل ۴-۶ مقدار فشار در ابتدا، وسط و انتهای تبدیل ورودی

(زیرگذر نوع ۵، $D=10\text{cm}$ ، روش آشفتگی Realizable)

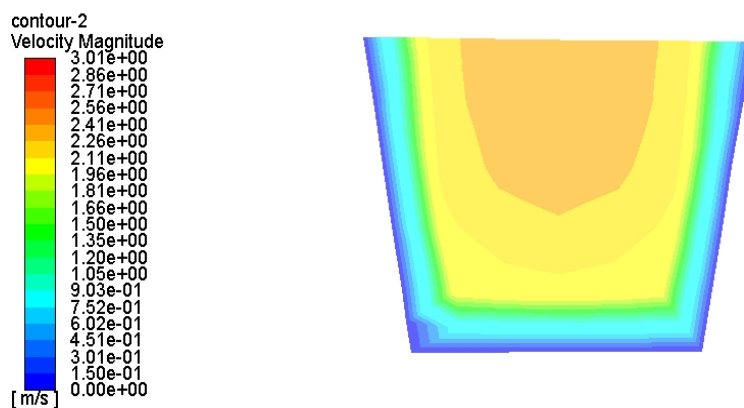
در شکل ۴-۶-ج مقدار فشار انتهای تبدیل نشان داده شده است که مقدار آن به صورت تقریبی برابر $10^3 * 5/98$ می باشد، فشار در تمام مقطع ثابت است.

مقایسه اشکال شکل ۴-۶ نشان می دهد که در طول تبدیل فشار جریان کاهش می یابد، با توجه به رابطه برنولی با کاهش فشار، سرعت افزایش می یابد. مقادیر سرعت در ابتدا، وسط و انتها تبدیل ورودی و یک متر بعد از تبدیل در کالورت بصورت شکل های ۴-۷-الف، ۴-۷-ب، ۴-۷-ج و ۴-۷-د با پراکنش دو بعدی سرعت بر حسب متر بر ثانیه نمایش داده شده است.



شکل ۴-۷-الف مقدار سرعت در ابتدای تبدیل ورودی

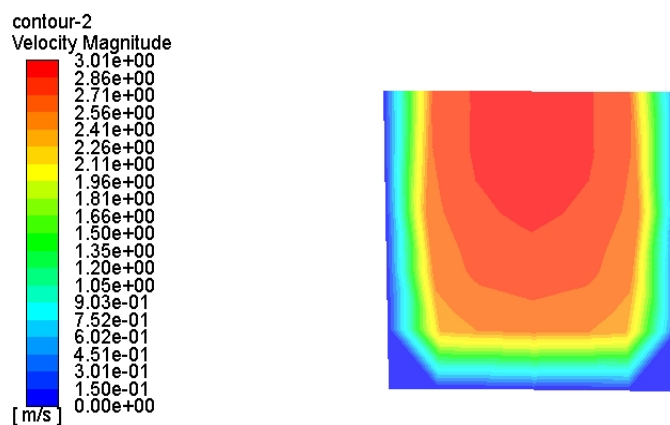
در شکل ۴-۷-الف مقدار سرعت ابتدای تبدیل مقطع دوزنقه ای نشان داده شده است، سرعت در سطح خیس شده برابر صفر و با دور شدن از دیواره و کف به صورت تقریبی تا $2/11$ متر بر ثانیه می رسد. بیشترین سرعت در سطح جریان و در وسط عرض مقطع می باشد که در حدود $2/26$ متر بر ثانیه است.



شکل ۴-۷-ب مقدار سرعت در وسط تبدیل ورودی

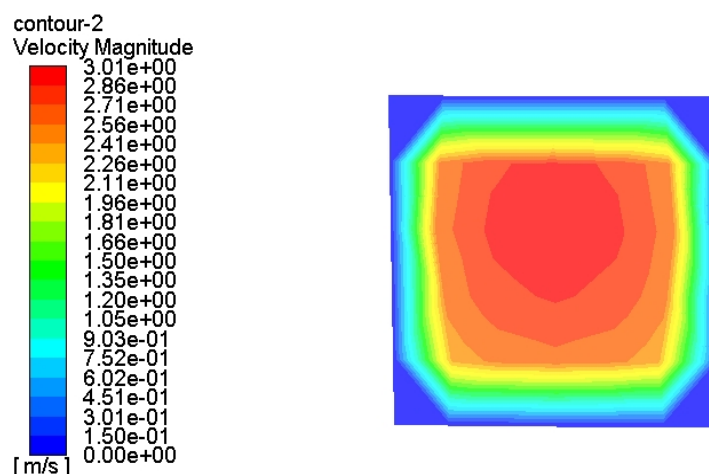
در شکل ۴-۷-ب مقدار سرعت وسط تبدیل مقطع دوزنقه ای نشان داده شده است، سرعت در سطح خیس شده برابر صفر و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع به صورت تقریبی تا $2/11$ متر بر

ثانیه می رسد. تغییرات سرعت از وسط مقطع تا سطح جریان افزایش می یابد و به حدود ۲/۴۱ متر بر ثانیه است.



شکل ۴-۷ ج مقدار سرعت در انتهای تبدیل ورودی زیرگذر

در شکل ۴-۷ ج مقدار سرعت انتهای تبدیل مقطع مربع ای نشان داده شده است، سرعت در سطح خیس شده برابر صفر و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع به صورت قابل توجه ای زیاد و در ۳ بازه به مقدار ۱/۹۶، ۲/۲۶، ۲/۴۱ متر بر ثانیه می رسد. تغییرات سرعت از وسط مقطع تا سطح جریان افزایش می یابد و به حدود ۲/۷۱ متر بر ثانیه است.



شکل ۴-۷-د مقدار سرعت در زیرگذر بعد از تبدیل ورودی

شکل ۴-۷ مقدار سرعت در ابتدا، وسط، انتهای تبدیل ورودی و در زیرگذر بعد از تبدیل ورودی

(زیرگذر نوع ۵، $D=10\text{cm}$ ، روش آشفتگی Realizable)

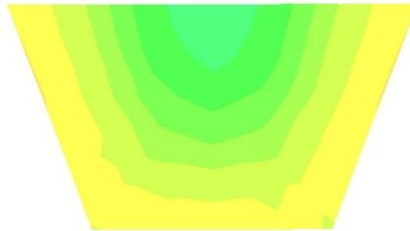
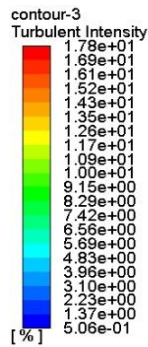
در شکل ۴-۷-د مقدار سرعت یک متر بعد از تبدیل ورودی، مقطع مربع ای نشان داده شده است، سرعت در سطح خیس شده برابر صفر و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع به صورت قابل توجه ای زیاد می شود بیشترین سرعت در مرکز مقطع و برابر $3/01$ می باشد.

مقایسه اشکال شکل ۴-۷ افزایش سرعت در طول تبدیل و پس از آن در کالورت را نشان می دهد.

۴-۱۰. تغییرات شدت آشفتگی در ابتدا و انتهای تبدیل

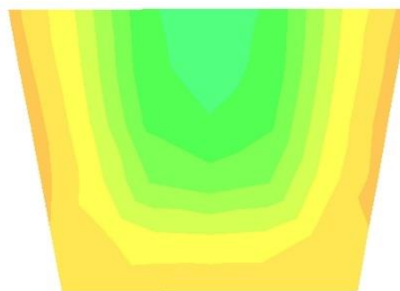
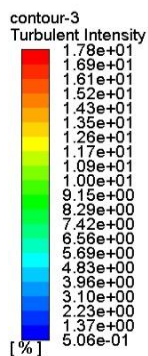
مقادیر شدت آشفتگی در ابتدا، وسط و انتها تبدیل ورودی بصورت شکل های ۴-۸-الف، ۴-۸-ب، ۴-

۸-ج با پراکنش دو بعدی نمایش داده شده است.



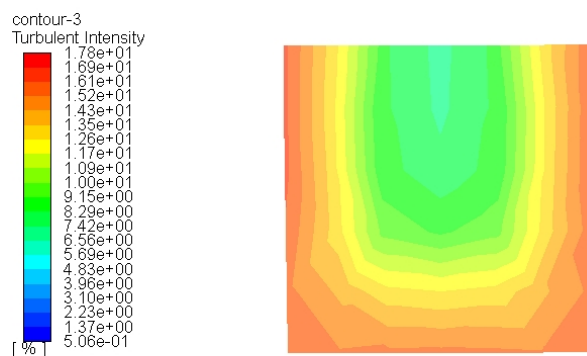
شکل ۴-۸-الف درصد شدت آشفتگی در ابتدای تبدیل ورودی

در شکل ۴-۸-الف تغییرات شدت آشفتگی در ابتدای تبدیل ورودی، مقطع دوزنقه ای نشان داده شده است، شدت آشفتگی در تماس با دیواره و کف به صورت تقریبی برابر با $10 * 1/17$ می باشد و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع شدت آشفتگی کاهش می یابد. شدت آشفتگی در سطح تا $4/83$ کاهش پیدا می کند.



شکل ۴-۸-ب درصد شدت آشفتگی در وسط تبدیل ورودی

در شکل ۴-۸-ب تغییرات شدت آشفتگی در وسط تبدیل ورودی، مقطع دوزنقه ای نشان داده شده است، شدت آشفتگی در تماس با دیواره و کف به صورت تقریبی برابر با $10 * 1/35$ می باشد و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع شدت آشفتگی کاهش می یابد. شدت آشفتگی در سطح تا $4/83$ کاهش پیدا می کند.



شکل ۴-۸-ج درصد شدت آشفتگی در انتها تبدیل ورودی

شکل ۴-۸ درصد شدت آشفتگی در ابتدا، وسط و انتهای تبدیل ورودی

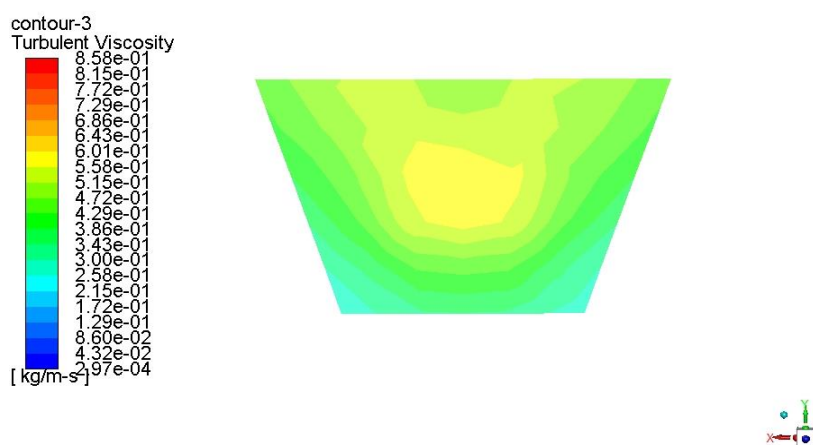
(زیرگذر نوع ۵، $D=10\text{cm}$ ، روش آشفتگی Realizable)

در شکل ۴-۸-ج تغییرات شدت آشفتگی در انتهای تبدیل ورودی، مقطع مربع ای نشان داده شده است، شدت آشفتگی در تماس با دیواره و کف به صورت تقریبی برابر با $10 * 1/52$ می باشد و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع شدت آشفتگی کاهش می یابد. شدت آشفتگی در سطح تا $4/83$ کاهش پیدا می کند.

همانطور که مشاهده می شود در طول تبدیل درصد شدت آشفتگی در نزدیک دیواره و کف مقطع افزایش قابل توجه ای دارد.

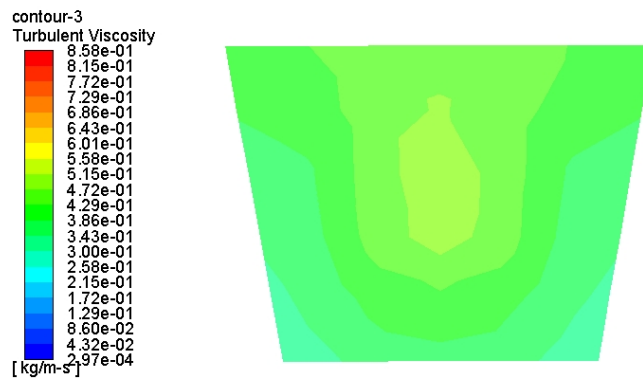
۱۱-۴. تغییرات لزجت گردابی در ابتدا و انتهای تبدیل

مقادیر شدت آشفتگی در ابتدا، وسط و انتها تبدیل ورودی بصورت شکل های ۴-۸-الف، ۴-۸-ب، ۴-۸-ج با پراکنش دو بعدی برحسب کیلوگرم برمتر در مجذور ثانیه نمایش داده شده است.



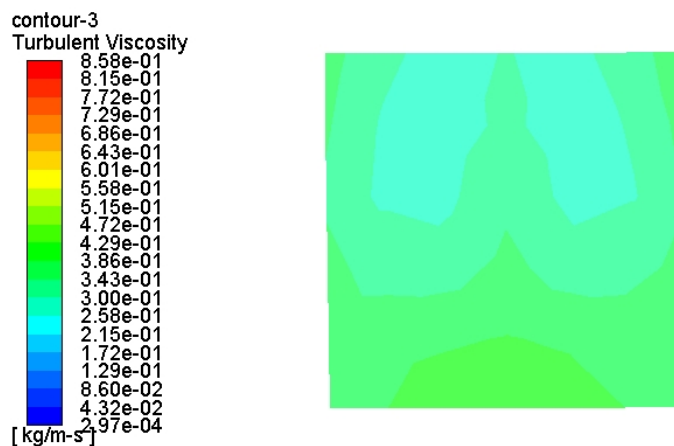
شکل ۴-۹-الف لزجت گردابی در ابتدای تبدیل ورودی

در شکل ۴-۹-الف تغییرات لزجت گردابی در ابتدای تبدیل ورودی، مقطع دوزنقه ای نشان داده شده است، لزجت گردابی در تماس با کف به صورت تقریبی برابر با $10^{-1} * 2/58$ می باشد و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع، لزجت گردابی افزایش می یابد. لزجت گردابی در وسط مقطع حدود $10 * 6/01$ است.



شکل ۹-۴ ب- لزجت گردابی در وسط تبدیل ورودی

در شکل ۹-۴ ب- تغییرات لزجت گردابی در وسط تبدیل ورودی، مقطع دوزنقه ای نشان داده شده است، کمترین مقدار لزجت گردابی به صورت تقریبی برابر با $۲/۵۸ * ۱۰^{-۱}$ می باشد و با دور شدن از دیواره و کف در وسط مقطع، لزجت گردابی افزایش می یابد. لزجت گردابی در وسط مقطع حدود $۵/۵۸ * ۱۰^{-۱}$ است.



شکل ۹-۴ ج- لزجت گردابی در انتهای تبدیل ورودی

شکل ۹-۴ ب- لزجت گردابی در ابتدا، وسط و انتهای تبدیل ورودی

(زیرگذر نوع ۵، $D=10\text{cm}$ ، روش آشفتگی Realizable)

در شکل ۴-۹ ج تغییرات لزجت گردابی در انتهای تبدیل ورودی، مقطع مربع ای نشان داده شده است، کمترین مقدار لزجت گردابی به صورت تقریبی برابر با $10^{-1} * 2/58$ می باشد و بیشتر مقدار لزجت گردابی حدود $10^{-1} * 6/01$ است.

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱. نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از روش های عددی موارد ذیل استنباط می شود:

(۱) با مقایسه نتایج و مشاهده ضرایب افت بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی مشخص شد درصد خطا در بین این دو روش کم می باشد، که مبین این است که روش های عددی می تواند جایگزین خوبی برای مدل سازی جریان آشفته زیرگذرهای آب و تعیین ضرایب افت موضعی باشد.

(۲) با مدل سازی جریان در ابعاد و اقطار مختلف و ضرایب به دست آمده این نتیجه حاصل می شود که ضریب افت انرژی، تابع بعد نمی باشد و فقط تابعی از شکل و زوایای تبدیل است، که بی بعد بودن ضریب افت انرژی نشان از این رفتار در شبیه سازی دارد.

(۳) در بیشتر مدل ها افت خروجی ۲ برابر افت ورودی می باشد که نشان می دهد تغییرات فشار در تبدیل های باز شونده خروجی بیشتر از تغییر فشار در ورودی که تبدیل تنگ شونده است می باشد.

(۴) در میان روش های آشفتگی مناسب ترین روش $k-\epsilon$ Realizable می باشد. زیرا با توجه به نزدیکی روش ها درصد خطا کمتری نسبت مدل آزمایشگاهی دارد.

۵-۲. پیشنهادات

مدل سازی زیرگذر با شیب های متفاوت در طول زیرگذر و ورودی و خروجی تبدیل و بررسی تاثیرات آن بر ضرایب افت.

اثر هندسه هایی با اشکال دیگر بر ضرایب افت و تعیین مناسب ترین هندسه با به دست آوردن بهترین شرایط هیدرولیکی با کمترین ضریب افت در عبور جریان سیال از زیرگذر را می توان شبیه سازی و بررسی کرد.

روش دیگر مدل سازی ایجاد موانع در ورودی و خروجی کالورت می باشد، با ایجاد بلوک هایی در ابعاد و زوایای مختلف می توان تاثیرات مانع بر ضرایب افت انرژی و آشفستگی را بررسی کرد. همچنین بهینه ترین حالت جهت کاهش ضریب افت و روش های آشفستگی را مشخص نمود.

مراجع و منابع

۱. حسینی س.م و ابریشمی ج. (۱۳۷۹)، "هیدرولیک کانال های باز"، ویرایش دوم، چاپ بیستم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.
۲. دفتر تحقیقات و معیار های فنی، مرکز تحقیقات و مطالعات. (۱۳۷۵)، آیین نامه طرح هندسی راه ها، چاپ اول، انتشارات سازمان برنامه بودجه.
3. Idel'chik. I. E. (1986). "Handbook of hydraulic resistance", Hemisphere Publishing, Washington, DC
4. Gardrl, A. (1962). "Perte de charge dans un entranglement conique", Editions de la Societedu Bolletin Technique de la Suisse Romande, Lausanne, 23
5. Apelt, C.J. (1983). "Hydraulics of Minimum Energy Culverts and Bridge Waterways" Australian Civil Engrg Trans, I.E.Aust., Vol. CE25, No. 2, pp. 89-95.
6. Hee, M. (1969). "Hydraulics of Culvert Design Including Constant Energy Concept" Proc. 20th Conf. of Local Authority Engineers, Dept. of Local Govt, Queensland, Australia, paper 9, pp. 1-27.
7. Blaisdell. W, Donnelly. C. A, Yalamanchili. K. (1969). "Abrupt Transition from a Circular Pipe to a Rectangular Open Channel" Technical Paper No. 53, Series B.
8. Michels. V. (1980). "Efficient Pipe Culvert Exit Transitions. 7th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference Brisbane", 18-22 August, 1980.
۹. احمدی ح. ابریشمی ج. (۱۳۸۷) " بررسی تاثیر سرعت جریان بر ضرایب افت انرژی در تبدیلهای عریض شونده لوله های تخلیه کننده و آبگیر سدها" دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاههای برقی.
10. Van Nam. N. & Archambeau. P & Dewals. B & Piroton. M & Epicum. S. (2013) "Local Head-Loss Coefficient at the Rectangular Transition from a Free-Surface Channel to a Conduit" JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE / DECEMBER 2013
۱۱. محمد کریم بیرامی. (۱۳۷۶)، "سازه های انتقال آب"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.

12. Shames I.R. (1982). "Mechanics of fluid", 2nd edition, McGraw-Hill international Book company.
13. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD, (1993) 13. H. Tennekes & J. Lumley, (1972), "A First Course in Turbulence" The MIT press Cambridge-Massachusetts.
14. Tennekes h. & Lumley J. (1972) " A First Course in Turbulance", The MIT press Cambridge-Massachusetts.
15. B. E. Launder & Spalding, (1972), "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, London, England.
16. D. Choudhury, (1993) "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107.
17. T. H. Shih & W. W. Liou & A. Shabbir & Z. Yang & J. Zhu, (1995) "A New K-epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows- Model Development and Validation",Computers Fluids 24(3):227-238.
18. W. C. Reynolds, (1978), "Fundamentals of Turbulence for Turbulence Modeling and Simulation " , Lecture Note For Von Karman Institute Agard Report no 755.
19. S. E. Kim & D. Choudhury & B. Patel, (1997), "Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code Fluent", ICASE/LaRC Interdisciplinary Series in Science and Engineering book series (ICAS, volume 7).
20. B. E Launder & D. B. Spalding, (1974), "The Numerical Computation Of Turbulent Flows"Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3:269-289.
21. S. E. Kim & D. Choudhury," A Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient", In ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows, ASME

22. T . Jongen,"Simulation and Modeling of Turbulent Incompressible Flows", PhD Thesis, EPF Lausanne, Lausanne, Switzerland.
23. H. C. Chen & V.C. Patel, (1988), "Near-wall turbulence models for complex flows including separation", AIAA Journal, 26(6):641-648.
24. M. M. Gibson & B. E. Launder, (1978), "Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer", Journal of Fluid Mechanics, 86:491-511.
25. B. Kader, (1981), "Temperature And Concentration Profiles in Fully Turbulent Boundary Layers", International Journal of Heat and Mass Transfer, 24(9):1541-1544.
26. P. Huang & P. Bradshaw & T. Coakley, (1993), ""Skin friction and velocity profile family for compressible turbulentboundary layers", AIAA Journal, 31(9):1600-1604.
27. Fluent 6.2 Users Guide, (January 2005)

۲۸. قاهرى ع، (۱۳۶۷)، "مکانیک سیالات محاسباتی"، چاپ اول، انتشارات گلابیول، تهران.

Abstract

The revision of energy loss coefficients in entrance and outlet of a culvert was done experimentally in the past. Related experts were defined factors such as the culvert's geo-formation and the outlet and entrance transition types, which are efficient on energy loss coefficients amount. In fact, in order to estimate the local energy loss coefficients, pressure gauges, are utilized on both sides of the culvert. Based on the difference of the two pressure amounts surveyed, and based on Bernoulli equations, the energy loss is calculated and the loss coefficients are obtained alternatively. Technically, the goal in this research is to process the methods using numerical simulations.

The numerical simulations used for culverts with different transitions are defined with various turbulence models and in comparison with experimental data, the most proper turbulence model is possessed. Due to the research, the numerical simulation ability is estimated for culverts. It is obvious that the variety in turbulence simulations may affect the results in different manners. The first step is to specify the suitable simulation for the culvert model.

The Fluent software is utilized to numerically model the culvert. Based on the significance of a fluid flow manner, some efforts are conducted to familiarize the readers with turbulent flows along with dominated equations and the past methods. The simulations for rectangular box culverts and circular culverts are done in four section modes and in each mode, the energy loss coefficients for the entrance and outlet of the culvert with different turbulences are calculated. After the simulations are done using various turbulence models for culvert entrance and outlet and with different transitions in Fluent software, and in comparison with the results obtained from experiments, the $k-\epsilon$ realizable model is suggested as the most suitable turbulence model.

Keywords: culvert, conduit, energy loss, coefficient loss, fluid dynamics, Fluent, turbulence model.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in water engineering and hydraulic structures

**Determination of loss coefficients underpass (Culvert) using
appropriate turbulence model**

By: seyed bahman jia

Supervisor:

Dr. Ramin Amini

January 2018