

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

بررسی تاثیر آبشکن در نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده ساز نقطه ای

نگارنده : علی منتظری

استاد راهنما

دکتر امیرعباس عابدینی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۳۵
تاریخ: ۹۶/۱۲/۸

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 علی منتظری با شماره دانشجویی ۹۳۱۶۵۷۴ رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه های هیدرولیکی تحت عنوان: بررسی تاثیر آبشکن در نحوه ی انتشار آلودگی حاصل از آلوده ساز نقطه ای 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: ۱۸/۳) درجه مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

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

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



دانشکده مهندسی عمران

تبصره: در صورتی که کسی در این صورتجلسه امضاء کرده باشد و در تاریخ دفاع از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ منظر مہربانی ما،

پدر و مادر عزیز

"لیس للانسان الاماسعی"

سپاس خدای را که سخوران، در ستودن او بانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و امدار وجودشان است.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصرو دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می کند و سلامت امانت های را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزوجل": از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر عبدینی که در کمال سع صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ کلمی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند، همچنین از خانواده عزیز و مخصوصاً پدر مادر عزیزم؛ و کلیه دوستانی که در تهیه و تدوین این تحقیق مشارکت مؤثر داشته اند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

علی منطری

تعهد نامه

اینجانب علی منتظری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تأثیر آبشکن در نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده ساز نقطه ای" تحت راهنمایی آقای دکتر امیر عباس عابدینی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

رودخانه ها به عنوان یکی از منابع آب سطحی، فاضلاب ناشی از فعالیت های انسانی را دریافت کرده و به کمک فرآیند انتقال - انتشار، آلودگی را در مسیر رودخانه پخش و غلظت آن را کاهش می دهند. در واقع ویژگی خود پالایی رودخانه ها جوامع را قادر خواهد ساخت که فاضلاب آلوده را به درون رودخانه ها رها سازند؛ در حالی که میانگین کیفیت آب رودخانه ها برای اهداف متفاوت قابل قبول باقی می ماند. برای پخش و اختلاط کامل آلودگی حداقلی از مسافت مورد نیاز است و این مسافت وابسته به غلظت آلودگی، شرایط هیدرولیکی رودخانه، شرایط هیدرولیکی ورودی فاضلاب مانند سرعت، زاویه ورود به مجرای اصلی آبراهه و مواردی مانند آن است. از آنجا که در طول این مسافت غلظت آلاینده فراتر از میزان مجاز است، در نتیجه کاهش این مسافت مصلحت مهندسی است. پس اگر بتوان آشفتگی در آب را افزایش داد، می توان طول اختلاط را کاهش داد. یک روش افزایش آشفتگی، استفاده از سازه ی آبشکن است. در این مطالعه شبیه سازی عددی جریان در یک کانال مستطیل شکل، به کمک نرم افزار *Flow-3D* صورت گرفته است. این تحقیق شامل سه بخش اصلی می باشد. در بخش اول جریان بدون در نظرگیری آلودگی شبیه سازی شده و خطوط جریان حاصل از این شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و مطابقت خوبی مشاهده شد. در بخش دوم شبیه سازی جریان به همراه ورود آلودگی انجام گرفت و با توجه به کارهای عددی و آزمایشگاهی مشابه میزان خطاهای به دست آمده در این بخش نیز قابل قبول بود. در بخش سوم که هدف اصلی این تحقیق می باشد، به منظور بررسی تأثیر مشخصه های هندسی آبشکن و همچنین تغییر شرایطی مانند دبی جریان، از آبشکن هایی با طول های ۰/۱ تا ۰/۷ متر استفاده شده است. در نهایت اثر نقاط مختلف ورود آلودگی و تاثیر پارامتر عمق بر پخش آلودگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از مدل آشفتگی *LES* استفاده شده است.

نتایج نشان داد، تغییر محل قرارگیری منبع آلودگی و تغییر طول آبشکن بر پخش آلودگی بسیار تاثیرگذار است. چنانکه با جانمایی آلودگی در مرکز گردابه و ورود آلودگی از بستر کانال بهترین نتایج بدست آمد.

کلمات کلیدی: آبشکن، انتشار آلودگی، معادله انتقال - انتشار، *Flow-3D*، مدل آشفتگی *LES*

مقالات ارائه شده :

شبیه سازی عددی الگوی جریان اطراف آبشکن منفرد، با استفاده از نرم افزار Flow-3D. کنفرانس
عمران، معماری و شهرسازی جهان اسلام، ۲۰۱۸

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول.....
۱	مقدمه و کلیات.....
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- کاربرد آب شکن ها
۳	۱-۲-۱- انواع آب شکن ها:
۴	۳-۱- اهمیت بررسی نحوه توزیع آلودگی
۵	۴-۱- اهداف پایان نامه
۵	۵-۱- ساختار پایان نامه
۷	مفاهیم اولیه و پیشینه پژوهش.....
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- تعریف آلودگی
۹	۳-۲- انواع روش های ورود آلاینده ها
۱۰	۴-۲- طبقه بندی آلاینده های منابع آب
۱۱	۱-۴-۲- طبقه بندی آلاینده ها از نظر کیفیت
۱۳	۲-۴-۲- طبقه بندی هیدرولیکی آلودگی:
۱۳	۲-۵- نحوه توزیع آلودگی:
۱۴	۲-۵-۱- آزمایش های کیفیت آب :
۱۵	۲-۵-۲- آنالیز کیفی رودخانه:
۱۵	۲-۵-۳- استاندارد کیفیت و حدود مجاز کیفی پساب:
۱۷	۲-۵-۴- روش های تقریبی:
۱۷	۲-۵-۵- روش های ریاضی:
۲۷	۲-۶- مطالعات پیشین در حوزه ی آب شکن:.....
۲۷	۲-۶-۱- مطالعات آزمایشگاهی
۲۹	۲-۶-۲- مطالعات عددی
۳۳	معرفی نرم افزار FLOW-3D.....
۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۵	۲-۳- معادله کلی حاکم بر پدیده انتقال - انتشار:

۳۷	۳-۳- حل عددی معادله حاکم:
۳۷	۳-۴- شرایط مرزی:
۳۸	۳-۵- نحوه مدل سازی جریان
۳۹	۳-۵-۱- معرفی نرم افزار FLOW-3D
۴۱	۳-۵-۲- معادلات حاکم بر جریان آشفته
۴۴	۳-۵-۳- انواع مدل های آشفتگی
۴۷	۳-۶- مواد مورد استفاده در این پژوهش:
۴۹	روش تحقیق و مدل سازی
۵۰	۴-۱- مقدمه
۵۰	۴-۲- صحت سنجی و دقت عملکرد نرم افزار
۵۰	۴-۲-۱- مدل سازی جریان اطراف آبشکن بدون ورود آلودگی
۵۹	۴-۲-۲- مدل سازی جریان اطراف آبشکن با در نظرگیری ورود آلودگی
۷۳	فصل پنجم: نتایج و بحث
۷۴	۵-۱- مقدمه
۷۴	۵-۲- هدف پایان نامه:
۷۵	۵-۳- نتایج توزیع آلودگی در حالات مختلف آبشکن با طول متفاوت:
۷۵	۵-۳-۱- Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل از آبشکن:
۷۸	۵-۳-۲- Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آبشکن، قبل از آبشکن
۸۲	۵-۳-۳- Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آبشکن
۸۶	۵-۳-۴- Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه
۹۰	۵-۳-۵- Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال
۹۴	۵-۳-۶- Case F: ورود آلودگی در نقطه ای به فاصله ی طول آبشکن و از کناره کانال
۹۸	۵-۴- تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر توزیع آلودگی:
۱۰۵	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۶	۶-۱- مقدمه:
۱۰۶	۶-۲- نتیجه گیری:
۱۰۷	۶-۳- پیشنهادهای برای پژوهش های آتی:

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) - حدود کیفی مجاز جهت تخلیه پساب به محیط‌های پذیرنده (برحسب میلی‌گرم بر لیتر) [۷].....	۱۶
جدول (۲-۲) - محاسبه ضرایب پراکندگی طولی [۱۹].....	۲۲
جدول (۱-۳) - مشخصات رایانه‌ی استفاده‌شده در پژوهش.....	۴۸
جدول (۱-۴) - شرایط کلی مدل‌سازی.....	۵۱
جدول (۲-۴) - خطای ناشی از مقادیر محاسباتی سرعت و سطوح آب.....	۵۷
جدول (۳-۴) - بررسی حالت‌های مختلف آشفستگی.....	۵۷
جدول (۴-۴) - حالت‌های مختلف مدل‌سازی منبع ورود آلودگی به جریان.....	۶۱
جدول (۵-۴) - مشخصات کلی مدل‌سازی با در نظرگیری منبع ورود آلودگی (حالت صحت‌سنجی آلودگی).....	۶۷
جدول (۶-۴) - مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی.....	۷۰
جدول (۱-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case A.....	۷۷
جدول (۲-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case B.....	۸۱
جدول (۳-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case C.....	۸۵
جدول (۴-۵) - مشخصات نقطه قرارگیری منبع آلودگی در Case D.....	۸۷
جدول (۵-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case D.....	۸۹
جدول (۶-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case E.....	۹۳
جدول (۷-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case F.....	۹۷
جدول (۸-۵) - طول گردابه‌ها با در نظر گرفتن اثر عمق در Case D.....	۱۰۲

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۳	شکل (۱-۱)-شمای کلی سازه ی آب شکن.....
۳	شکل (۱-۱)-شمای کلی سازه ی آب شکن.....
۱۹	شکل (۱-۲)- فرایند انتشار
۲۰	شکل (۲-۲)- اصل بقا جرم در مورد یک کمیت پایدار.....
۳۵	شکل (۱-۳)- نمایش حجم کنترل در نظر گرفته شده
۳۸	شکل (۲-۳)- شرایط مرزی مختلف در معادله انتقال- انتشار
۳۸	شکل (۳-۳)-نمایش محیط فیزیکی مسئله در مدل سازی
۵۰	شکل (۱-۴)- هندسه کلی کانال در مدل سازی
۵۲	شکل (۲-۴)- مدل ساخته شده در نرم افزار Autocad
۵۳	شکل (۳-۴)- مش بندی در مدل سازی
۵۸	شکل (۴-۴)- مقایسه مؤلفه های سرعت در جهت طولی بر حسب نتایج آزمایشگاهی ژین و تانگ و نتایج عددی موجود
۵۹	شکل (۵-۴)- سطوح آب در اطراف آب شکن در نقاط متفاوت روی محور طولی
۵۹	شکل (۶-۴)- خطوط جریان و گردابه ی شکل گرفته در اطراف آب شکن
۶۱	شکل (۷-۴)- هندسه مدل سازی در Case A
۶۱	شکل (۸-۴)- منوی اصلی مدل سازی در نرم افزار Flow-3D
۶۳	شکل (۹-۴)- شبکه بندی و مرز بندی جریان
۶۴	شکل (۱۰-۴)- شرایط مرزی شبکه بندی شماره ۱
۶۵	شکل (۱۱-۴)- شرایط مرزی شبکه بندی شماره ۲
۶۸	شکل (۱۲-۴)- ناحیه محاسباتی اطراف آب شکن
۶۹	شکل (۱۳-۴)- مش بندی ناحیه محاسباتی و محل ورود آلودگی
۷۱	شکل (۱۴-۴)- غلظت آلودگی به عنوان تابعی از زمان در مقطع عرضی $X_0/L_0=12/10$
۷۱	شکل (۱۵-۴)- غلظت آلودگی به عنوان تابعی از زمان در مقطع عرضی $X_0/L_0=27/10$
۷۵	شکل (۱-۵)- موقعیت نقطه ورود آلودگی در Case A
۷۶	شکل (۲-۵)- توزیع آلودگی در Case A
۷۷	شکل (۳-۵)- نمونه اندازه گیری طول آلودگی
۷۸	شکل (۴-۵) میزان تأثیر ابعاد آب شکن بر طول آلودگی
۷۹	شکل (۵-۵)- موقعیت نقطه ورود آلودگی Case B

- شکل (۵-۶) - توزیع آلودگی در Case B ۸۰
- شکل (۵-۷) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case B ۸۲
- شکل (۵-۸) - موقعیت نقطه ورود آلودگی در Case C ۸۳
- شکل (۵-۹) - توزیع آلودگی در Case C ۸۴
- شکل (۵-۱۰) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case C ۸۶
- شکل (۵-۱۱) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case D ۸۷
- شکل (۵-۱۲) - توزیع آلودگی در Case D ۸۸
- شکل (۵-۱۳) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case D ۹۰
- شکل (۵-۱۴) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case E ۹۱
- شکل (۵-۱۵) - توزیع آلودگی در Case E ۹۲
- شکل (۵-۱۶) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case E ۹۴
- شکل (۵-۱۷) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case F ۹۵
- شکل (۵-۱۸) - توزیع آلودگی در Case F ۹۶
- شکل (۵-۱۹) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case F ۹۸
- شکل (۵-۲۰) - نمودار توزیع آلودگی برای دبی $0/1322 (m^3/s)$ ۹۹
- شکل (۵-۲۱) - مقایسه نتایج توزیع آلودگی در دبی‌های $0/1322 (m^3/s)$ و $0/0661 (m^3/s)$ در Case D ۱۰۰
- شکل (۵-۲۲) - تأثیر عمق بر توزیع آلودگی نقطه‌ای در کانال در Case D ۱۰۱
- شکل (۵-۲۳) - نمایش توزیع آلودگی در مقطع X-Z و چند تراز مختلف در عمق ۱۰۲
- شکل (۵-۲۴) - مقایسه بین مدل‌سازی‌های متفاوت در توزیع آلودگی ۱۰۳

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

آب برای زندگی و همه فعالیت‌های انسان حیاتی است و دسترسی به آب سالم، کافی و باکیفیت مناسب از بارزترین شرایط دستیابی به توسعه پایدار است. در میان منابع آبی، رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع تأمین آب می‌باشند که جهت مصارف شرب، کشاورزی، آبیاری و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. متأسفانه امروزه با پیشرفت صنعت و فناوری، آب‌های سطحی و رودخانه‌ها اکثراً به‌عنوان تخلیه گاه اصلی و عمده فاضلاب و پساب ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی به کار گرفته می‌شوند. این امر، باعث کاهش کیفیت منابع آبی برای مصارف مختلف و متنوع در پایین دست رودخانه‌ها می‌شود. در نتیجه باید هزینه زیادی صرف تصفیه و بالا بردن وضع کیفی آب در حد قابل قبول کرد.

با افزایش جمعیت و در نتیجه تقاضای استفاده از آب برای مقاصد مختلف، لزوم توسعه سرمایه‌گذاری در بخش آب و سازه‌های هیدرولیکی امری اجتناب‌ناپذیر است. ارزیابی کیفی منابع آب به‌عنوان اولین قدم در مدیریت آب، نیازمند تعیین هدف‌های ارزیابی مبتنی بر کاربری‌های تعریف‌شده، قوانین، مقررات ملی و کنترل منابع آلاینده است. منابع آبی سطحی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن بیشتر از منابع آب زیرزمینی در معرض آلودگی هستند و جلوگیری از آلودگی این منابع آبی، مانع ایجاد خسارت‌های اقتصادی و انسانی خواهد بود. از سوی دیگر دفع فاضلاب‌های شهری و صنعتی به‌گونه‌ای که کمترین زیان را وارد کرده و به توسعه پایدار در صنعت لطمه‌ای وارد نیاورد، اهمیت بسیار دارد.

۱-۲- کاربرد آب‌شکن‌ها^۱

آب‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که اغلب به‌صورت عمود بر مسیر جریان رودخانه از کناره به سمت داخل رودخانه ساخته می‌شوند. آب‌شکن‌ها از یک سمت به ساحل رودخانه متصل شده و تا مسافتی در داخل بستر رودخانه جلو می‌آیند. در این سازه‌ها سرعت آب به هنگام برخورد با آب‌شکن کم شده و جریان

^۱ Groyns

پس از چرخش به آبشکن بعدی برخورد می‌کند و بدین وسیله نیروی فرسایش آب مستهلک می‌شود، از طرفی به علت کم شدن سرعت آب، رسوبات حل شده در جریان نیز ته‌نشین می‌شوند [۱].

این سازه‌ها به لحاظ ساختار سازه‌ای، ساده و قابلیت سازگاری با شرایط متنوع دارای کاربرد وسیعی در طرح‌های ساماندهی و به‌ویژه اقدامات تثبیت و پایدارسازی کناره‌ها می‌باشند. از این رو بررسی و شناخت رفتار جریان و رسوب‌گذاری در محدوده‌ی آبشکن‌ها از جنبه‌های مختلف طراحی، حفاظت و نگهداری دارای اهمیت فراوانی است [۲]. شکل (۱-۱)، نمای کلی سازه‌ی آبشکن تعبیه شده در سواحل رودخانه و یا دیواره کانال را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) - نمای کلی سازه‌ی آبشکن

۱-۲-۱- انواع آبشکن‌ها:

آبشکن بر اساس موارد مختلف مانند توجه به مصالح در دسترس، شرایط حاکم بر جریان (شرایط هیدرولیکی) و ... به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند [۳ و ۴]:

- تقسیم‌بندی بر اساس مصالح ساختمانی که در آن آبشکن‌ها به دو نوع آبشکن تراوا (باز یا نفوذپذیر) و آبشکن ناتراوا (بسته یا نفوذناپذیر) تقسیم می‌شوند.

- تقسیم‌بندی بر اساس ارتفاع که در آن آب شکن‌ها به دو نوع مستغرق و غیر مستغرق تقسیم می‌شوند. چنانچه آب‌شکن زیرآب قرار داشته باشد آب‌شکن مستغرق و در غیر این صورت آب‌شکن غیر مستغرق نامیده می‌شود.
- تقسیم‌بندی بر اساس شکل سازه که دارای اشکال مختلف از جمله آب‌شکن T شکل، مستقیم، سر کج، چوگانی، چوگانی برگشته و ... است.

۱-۳- اهمیت بررسی نحوه توزیع آلودگی

مطالعه روی کیفیت آب‌های سطحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و این موضوع وقتی منبع تهیه آب آشامیدنی انسان‌ها و آب لازم برای صنایع از رودخانه‌ها تأمین می‌شود و فاضلاب و پساب‌های صنعتی در رودخانه تخلیه می‌شود، نیاز به توجه بیشتری دارد [۵].

در برخی از مناطق جهان، تخلیه آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسان در آب‌های جاری، کیفیت آب را به‌طور جدی مورد تهدید قرار داده است. کیفیت و میزان مقبولیت آب رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، برحسب نوع استفاده‌ای که از این منابع می‌شود مشخص می‌گردد. برای فعالیت‌هایی نظیر ماهیگیری، شنا، قایقرانی و کشتیرانی، به آبی باکیفیت متفاوتی از مصارف شرب که واجد استانداردهای سخت‌گیرانه است، نیاز است. برای تشخیص میزان مجاز تخلیه آلاینده به یک منبع آب، باید نوع آلاینده، چگونگی توزیع آن در آب و تأثیر آن بر کیفیت آب مشخص شود. به‌طور کلی هدف از مدیریت کیفیت آب حفاظت از یک منبع آب است به‌طوری‌که آب موردنظر برای مصارفی که قبلاً برای آن در نظر گرفته شده است، قابل‌استفاده بوده و بتوان از آن آب به‌عنوان یک فاکتور اقتصادی برای دفع مواد زائد در شرایط اضطراری نیز استفاده کرد، همچنین باید دانست که تأثیر فاکتورهای طبیعی نظیر وضعیت عوارض زمین و شرایط آب و هوایی منطقه نیز بر کیفیت آب چگونه است [۶]. به‌این ترتیب پیش‌بینی میزان آلودگی انتقال یافته در آب‌های سطحی نظیر رودخانه در اثر ورود آلودگی در نقاط مختلف محیط و باگذشت زمان، امری بسیار مهم بوده و برای تعیین شرایط و استانداردهای خاص برای تخلیه پساب بسیاری از کارخانه‌ها و

یا هر نوع آلودگی دیگر به رودخانه‌ها ضروری است. چراکه اگر میزان آلودگی از ظرفیت خودپالایی رودخانه تجاوز نماید اکوسیستم رودخانه به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و رشد و نمو آبزیان، گیاهان و سایر اجزای اکوسیستم دچار اختلال می‌گردد [۷]. اگر مکانیسم انتقال و پخش آلودگی در رودخانه‌ها با ژئومتری های مختلف مشخص شده باشد، می‌توان برای کاهش اثرات آلودگی بر سلامت عموم جامعه‌ی انسان‌ها با اختلاط آب و تقویت خود پالیندگی رودخانه‌ها برنامه‌ریزی نمود [۵].

۴-۱- اهداف پایان نامه

روند رو به رشد آلودگی آب‌های سطحی در سراسر جهان نیاز به استفاده از فرآیندهای اختلاط یا رقیق‌سازی را الزامی نموده است. هم‌اکنون استفاده از فرایند پخشیدگی و تقویت خود پالایی رودخانه یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت زیست‌محیطی رودخانه محسوب می‌شود. با تزریق آلاینده‌ها به درون رودخانه‌ها انتقال آن‌ها به پایین دست توسط فرایند اختلاط با جریان و پراکنش‌های طولی و عرضی و عمقی انجام می‌شود. چنانچه بتوان در مسیر رودخانه‌ها اختلاط را ایجاد کرد توان خود پالایی آن‌ها افزایش می‌یابد، برای ایجاد این اختلاط می‌توان در مسیر کانال از سازه‌ای به نام آب‌شکن استفاده نمود. برای طراحی یک آب‌شکن باید ضوابطی را برای پارامترهای طراحی از قبیل طول، عرض، ارتفاع آب‌شکن و محل ورود آلاینده را به دست آورد. تغییر شرایط هیدرولیکی (مانند تغییر دبی و ...) و تأثیر آن‌ها بر فرایند پخش نیز بایستی معلوم شود. این پایان‌نامه به بررسی این شرایط برای حصول بهترین نتیجه از قرارگیری آب‌شکن می‌پردازد.

۵-۱- ساختار پایان نامه

در فصل اول به کلیاتی در مورد تحقیق پرداخته و هدف از انجام آن بحث شده است. پیشینه‌ی تحقیقاتی انجام‌شده در فصل دوم این پژوهش بیان گردیده است. فصل سوم به معرفی نرم‌افزار FLOW-3D و کلیات مدل‌سازی اختصاص داده شده است. در فصل چهارم جزئیات مدل عددی را شرح داده و صحت

سنجی کار با نرم‌افزار صورت پذیرفته است. آنالیز نتایج، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی به ترتیب در

فصل‌های پنجم و ششم مطرح شده است.

فصل دوم :

مفاهیم اولیه و پیشینه پژوهش

۱-۲- مقدمه

در هر پژوهش با توجه به انجام تحقیق‌های مشابه در زمینه‌های مختلف یک کار علمی، بررسی و مطالعه دقیق کارهای انجام‌شده در رابطه با یک تحقیق از عوامل مؤثر و ضروری در پیشبرد هدفمند یک پروژه علمی است. به همین منظور این فصل به مطالعات مرتبط با موضوع پژوهش حاضر اختصاص یافته است. جهت بررسی تاریخچه موضوع، با توجه به اهداف پژوهش، مطالعات پیشین در چند قسمت مورد مطالعه قرار گرفت. در قسمت اول این مطالعات بررسی مختصری در رابطه با مسئله‌ی آلودگی و پخش آن در منابع آب پرداخته می‌شود. در قسمت بعدی به بررسی سازه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش یعنی آب‌شکن منفرد و پژوهش‌های صورت گرفته در آن پرداخته شده است.

۲-۲- تعریف آلودگی^۱

در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته منابع طبیعی آب به‌وفور یافت می‌شود، لیکن افزایش مصرف این منابع در کنار افزایش جمعیت لزوم در نظر گرفتن کیفیت آب را پررنگ‌تر کرده است. آلودگی به‌طور کلی به معنای وارد کردن یا وارد شدن مواد زیان‌بار سمی در محیط‌زیست انسان، حیوان و یا گیاه در اندازه‌های بیش‌ازحد مجاز و خارج از توان‌زیستی آن‌هاست که سبب مخاطره‌آمیز شدن منابع زیستی و به خطر افتادن زندگی و سلامت جانداران می‌شود. به‌عبارت‌دیگر ورود انواع آلاینده‌ها به یک محیط که باعث ناپایداری، اختلال، آسیب و یا ناراحتی در آن محیط برای موجودات زنده شوند را آلودگی می‌گویند. آلودگی می‌تواند به شکل انرژی و یا به شکل مواد شیمیایی باشد. بایستی به این نکته توجه نمود که مواد آلوده‌کننده‌ای که در پی رویدادهای طبیعی پدید می‌آیند، زمانی به‌عنوان آلاینده شناخته خواهند شد که میزان آن‌ها از حد طبیعی بگذرد [۸].

^۱pollution

مهم‌ترین مسئله بشر امروز، تهیه‌ی آب آشامیدنی سالم است و آب آشامیدنی، آبی است که عوامل فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و رادیو کلوئیدی آن در حدی باشد که مصرف آن جهت آشامیدن، عارضه سوئی در کوتاه‌مدت یا درازمدت در انسان ایجاد نکند [۹].

کیفیت منابع آب در هر منطقه تحت تأثیر علل و عواملی با منشأ طبیعی یا اجتماعی، دچار تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌شود که این تغییرات محدودیتی جدی در بهره‌برداری از منابع آب به وجود می‌آورند و اصلی‌ترین نوع آلودگی محیط‌زیست که بشر امروزه با آن دست‌به‌گریبان است آلودگی آب است و آب آلوده به تغییر و تحولات کیفی آب، ناشی از فعالیت‌های مستقر در مجاورت منابع (حوضه ی آبریز) اطلاق می‌شود [۸].

برخی از این آلودگی‌ها زوال‌پذیر بوده و می‌توان آن‌ها را تغییر داد همانند مواد آلی موجود در فاضلاب‌های بهداشتی. اما برخی از آلاینده‌ها همانند فلزات سنگین ناشی از فاضلاب‌های صنعتی از بین نمی‌روند، لذا بایستی اقدامات اساسی در خصوص پیشگیری از ورود این نوع از آلاینده‌ها به منابع آبی صورت پذیرد. با توجه به وضعیت عوامل تشدیدکننده آلودگی آب همچون: افزایش بی‌رویه جمعیت، توسعه شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی در آینده انتظار می‌رود مشکلات خاص ناشی از افت کیفیت آب گسترش یابد. بدیهی است در چنین شرایطی علاوه بر محیط‌زیست انسانی، محیط‌زیست آبی نیز در معرض تهدیدهای جدی‌تر قرار خواهد گرفت.

۲-۳- انواع روش‌های ورود آلاینده‌ها

به‌طور کلی آب‌های سطحی و زیرزمینی مسیری مهم برای انتقال آلاینده‌ها به محیط‌زیست و انسان است [۷]. انواع روش‌های انتشار آلاینده‌ها در رودخانه‌ها به‌صورت‌های زیر است:

- انتشار مرحله‌ای^۱ یا پیوسته یک آلاینده به جریان، در این حالت آلودگی می‌تواند در بازه‌ای از زمان وارد رودخانه شود و یا در طول زمان ادامه داشته باشد [۱۰].
- انتشار لحظه‌ای^۲ آلاینده که در این مورد آلاینده به‌طور غیر مدت‌دار و لحظه‌ای وارد جریان می‌شود، مانند انتشار سریع و اختلاط حجم بسیار زیاد از یک ماده روغنی در رودخانه

۲-۴- طبقه‌بندی آلاینده‌های منابع آب

به‌طور کلی آلاینده‌های منابع آب را می‌توان با دو دیدگاه اصلی به‌صورت ذیل طبقه‌بندی نمود [۸].

الف) طبقه‌بندی بر اساس نوع آلاینده، که خود به روش‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- آلاینده‌های آلی و معدنی
- آلاینده‌های فیزیکی و بیولوژیکی
- آلاینده‌های محلول و معلق

ب) طبقه‌بندی بر اساس منبع تولید آلاینده که به دو قسم زیر است:

منابع آلاینده با کانون متمرکز (نقطه‌ای)^۳: ناشی از فعالیت‌هایی است که آلودگی از منابع مشخص و معین به طرق مختلف و به‌طور دائم وارد سیستم آبی می‌شوند؛ نظیر مجرای خروجی یک فاضلاب. این منابع قابل تشخیص و محدود می‌باشند به‌عبارت‌دیگر منبع ورودی قابل مشاهده و معینی دارند [۱۱].

پساب تصفیه‌خانه‌های شهری و صنعتی، شیرابه ناشی از دفن مواد زائد جامد و محل ریزش فاضلاب‌های سطحی به آب از جمله منابع آلاینده نقطه‌ای به‌شمار می‌روند. زیرا از طریق یک شبکه (به‌وسیله لوله یا کانال) جمع‌آوری و از یک نقطه به آب پذیرنده تخلیه می‌گردند [۷].

^۱ Step Input of A Pollution

^۲ Instantaneous Release

^۳ Point Sources

منابع آلاینده با کانون غیرمتمرکز (غیر نقطه‌ای)^۱: این نوع آلاینده‌ها می‌توانند در منطقه وسیع به صورت پراکنده در بعضی اوقات سال وارد محیط‌های آبی شوند. این نوع آلودگی‌ها ناشی از طیف وسیعی از فعالیت‌های انسانی است که در آن آلاینده‌ها، منبع ورودی قابل مشاهده و معینی ندارند، از این رو منابع آلاینده با کانون نامتمرکز، به نام آلاینده با منابع غیر معین نیز خوانده می‌شوند. مهم‌ترین منبع آلودگی غیر نقطه‌ای رواناب‌های شهری و کشاورزی هستند [۶].

۲-۴-۱- طبقه‌بندی آلاینده‌ها از نظر کیفیت

در دسته‌بندی بر اساس نوع آلاینده، آنچه مورد بررسی قرار می‌گیرد، یک پارامتر خاص بوده که می‌تواند از هر منبعی تأمین شود، اما عموماً برای شناسایی و بررسی منابع آلاینده بهترین رویکرد، دسته‌بندی آلاینده‌ها بر اساس منبع به وجود آورنده آن‌ها است [۹].

- زباله‌های اکسیژن خواه
- مواد غذایی گیاهی
- نفت
- عوامل بیماری‌زا
- ترکیبات آلی سنتز شده
- مواد شیمیایی معدنی و کانی‌ها
- رسوبات
- مواد رادیواکتیو
- گرما

در ادامه برخی از موارد فوق به اختصار بیان می‌شوند:

مواد اکسیژن خواه، باعث کاهش و مصرف اکسیژن محلول در آب می‌شوند. صنایع غذایی و کاغذسازی

^۱ Non Point Sources

از جمله صنایعی هستند که تولید مواد زائد اکسیژن خواه می کنند [۱۲].

متداول ترین روش برای اندازه گیری مقدار مواد آلی اکسیژن خواه، آزمایش اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی^۱ است. در آزمایش مذکور فرض بر این است که تمامی مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیک موجود در نمونه آب به وسیله میکروارگانیسمها و با مصرف اکسیژن به CO₂ و آب تبدیل می شوند.

BOD یک آزمایش زیست آزمونی^۲ است که در آن میکروارگانیسمها در شرایطی مشابه با وضعیت طبیعی موجود در آب برای اندازه گیری غیرمستقیم مقدار مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی موجود استفاده می شوند [۶].

فلزات و ترکیبات شیمیایی آلی سمی که در روانابهای کشاورزی - به دلیل استفاده از آفت کشها و علف کشها - و همچنین برخی از صنایع، موجود می باشند، با توجه به این که برخی از ترکیبات سمی در زنجیره غذایی تغلیظ می شوند، حتی مقادیر جزئی از این آلایندهها در آب رودخانه می تواند برای اکوسیستمهای طبیعی و بعضی مصارف انسانی نامناسب باشد [۱۳].

تخلیه انواع نمکها از طریق صنایع یا نمکهای استفاده شده در جادهها به رودخانهها، افزایش غلظت نمکها در رودخانهها به سمت پایین دست را در پی داشته و باعث می شود آب برای مدت طولانی جهت مصارف انسانی و آبیاری قابل استفاده نباشد و موجب خسارات به محصولات کشاورزی یا مسمومیت خاک شود.

رسوبات یکی دیگر از آلودگی هاست که به طور طبیعی در فرآیندهای فرسایشی به وجود می آیند. رسوبات در اثر این فرآیندها موجب آلودگی گسترده آبهای سطحی می گردند. ورود جامدات معلق در این حالت، حداقل ۷۰۰ برابر مقداری است که توسط فاضلاب وارد آبهای طبیعی می شود. تأثیر انسان بر سرعت فرسایش و همچنین اثر درازمدت رسوبات از جمله مسائلی است که باید به دقت بررسی شود.

^۱ Biochemical Oxygen Demand (BOD)

^۲ Bioassay

سرعت فرسایش توسط کشاورزی به میزان ۴ تا ۹ برابر و توسط عملیات ساختمانی ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد. عملیات تخلیه معادن به میزان زیادی بر روی فرسایش در یک منطقه تأثیر می‌گذارد. رسوبات حاصل از معادن چندین برابر بیشتر از رسوبات کشاورزی است [۷].

گرما معمولاً از نظر بیشتر مردم، یک آلوده‌کننده و حداقل به‌عنوان یک عامل فاسد کننده شیمیایی نیست. گرچه افزایش دمای آب بدن سبب تأثیرات زیان باری به بزرگی بسیاری از آلوده‌کننده‌های شیمیایی می‌شود. این شکل جدی آلوده‌کننده حرارتی، ابتدا از عملکرد آب‌های مورد استفاده به‌عنوان سردکننده در بسیاری از فرآیندهای صنعتی سرچشمه می‌گیرد [۹].

اکنون که انواع طبقه‌بندی آلودگی از لحاظ زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت بهتر است طبقه‌بندی هیدرولیکی آلودگی مطرح شود:

۲-۴-۲- طبقه‌بندی هیدرولیکی آلودگی:

مسائل پراکندگی^۱ آلودگی که چگالی آلاینده‌ها مشابه چگالی سیال (آب) درون آبراهه اصلی (سیال دریافت‌کننده) است. در این صورت آلاینده‌ها به‌صورت معلق درون آب خواهند بود. مانند آلودگی‌های رسوبی ناشی از فرسایش، آلودگی‌های ناشی از پخش فلزات سنگین، آلودگی ناشی از پخش مواد شیمیایی و سمی و بسیاری دیگر از انواع آلودگی‌های رایج در این دسته قرار می‌گیرند [۱۴]. مطالعه اخیر بر روی همین نوع آلودگی خواهد بود. در ادامه به‌طور مفصل به این موضوع پرداخته و روابط ریاضی توزیع این نوع آلودگی به دست خواهد آمد.

۲-۵- نحوه‌ی توزیع آلودگی:

یکی از مسائل مهم که در سال‌های اخیر توجه محققین را جلب کرده است، مکانیسم انتقال و انتشار آلودگی در آب‌های سطحی است و جز در برخی موارد مطالعات دقیقی بر روی این پدیده صورت نگرفته است. در چند دهه اخیر روش‌های مختلفی بر اساس مشاهدات میدانی، مدل‌های آزمایشگاهی، روش‌های

^۱ Dispersion

تحلیلی و مجموعه وسیعی از مدل‌های عددی، در جهت توصیف و پیش‌بینی حرکت آلودگی در آب‌های سطحی توسعه یافته‌اند [۱۵].

۲-۵-۱- آزمایش‌های کیفیت آب :

ترکیب شیمیایی آب H_2O ، فرمول شیمیایی کاملاً شناخته شده‌ای است. آب می‌تواند به حالت‌های جامد، مایع و گاز وجود داشته باشد، گرچه در اینجا در خصوص نوع مایع آن بحث می‌شود. آزمایش‌های اصلی کیفیت آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، سواحل و آب‌های نزدیک ساحل به صورت معمول در یکی از سه گروه عمده شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی قرار می‌گیرند. در ادامه موارد فوق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۵-۱-۱- آزمایش‌های شیمیایی:

آزمایش‌های شیمیایی آب، خود به سه دسته تعیین مواد آلی، تعیین فلزات و تعیین مواد معدنی و غیرفلزی قابل تقسیم بندی است.

۲-۵-۱-۲- آزمایش‌های فیزیکی:

آزمایش‌های به کاررفته شده جهت تعیین خواص فیزیکی آب را می‌توان شامل موارد زیر دانست:

- هدایت مخصوص
- باقیمانده قابل ته‌نشین شدن برحسب وزن
- باقیمانده غیرقابل صاف کردن I
- باقیمانده کل جامدها و کل مواد قابل صاف شدن II

۲-۵-۱-۳- آزمایش‌های میکروبیولوژیکی:

وجود حیات در محیط‌های آبی، اولین نشانه کیفیت آب است لذا می‌توان آزمایش‌های باکتریایی آب را برای تعیین پتانسیل بیماری‌زایی یا درجه آلودگی انجام داد. دو گروه عمده ارگانیسم‌های بیولوژیکی به‌عنوان شاخص‌های آلودگی به کار می‌روند. مجموع کلیفرم‌های غیر مدفوعی و کلیفرم‌های مدفوعی، هر دو این‌ها به‌عنوان شاخص در فاضلاب به کار می‌روند.

۲-۵-۲- آنالیز کیفی رودخانه:

به طور کلی کیفیت منابع آب تحت تاثیر پارامترهای بسیاری قرار دارد که شناسایی نوع و میزان تاثیر هر یک از آن ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. شاخص کیفی آب جهت اندازه گیری تغییرات کیفیت آب، مقایسه کیفیت آب های مختلفی که به رودخانه می ریزند و حتی مقایسه کیفیت آب رودخانه های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۵-۳- استاندارد کیفیت و حدود مجاز کیفی پساب:

نظر به اهمیت بررسی و اعمال کنترل بر روی فاضلاب (یا پساب) خروجی واحدهای صنعتی به منظور حفاظت از محیط زیست و منابع آبی پذیرنده، در کشورهای مختلف استانداردها و حدود مجاز متفاوتی برای این امر در نظر گرفته شده است. در کشور ما نیز استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست (سال ۱۳۷۳) و ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از پساب و آب های برگشتی (دفتر استاندارد صنعت آب و آبفا- سال ۱۳۸۸)، حدود مجازی را برای ۵۲ پارامتر کیفی در نظر گرفته اند که در جدول (۱-۲) جهت آشنایی به نمونه هایی از آن ها اشاره می شود.

از جنبه های مثبت استانداردهای یاد شده این است که حدود مجاز پارامترهای کیفی با در نظر گرفتن نوع منبع پذیرنده فاضلاب مشخص گردیده است. بر این اساس منابع پذیرنده فاضلاب در سه گروه کلی منابع آب سطحی، چاه جاذب و مصارف کشاورزی و آبیاری در نظر گرفته شده اند [۸].

جدول (۱-۲) - حدود کیفی مجاز جهت تخلیه پساب به محیط‌های پذیرنده (برحسب میلی‌گرم بر لیتر) [۷]

تخلیه به آب‌های زیرزمینی	جهت مصارف کشاورزی و آبیاری	تخلیه به آب‌های سطحی	مواد آلوده‌کننده
-	2	2	اکسیژن محلول
-	-	-	هدایت الکتریکی
1	0.2	1	مس
10	-	50	نیترات
10	-	3	نیتريت
5-9	6-8.5	6.5-8.5	PH
5	5	5	آلومینیوم
1	-	2.5	نیتروژن آلی
6	-	6	فسفات
1000	1000	1000	کلیفرم کلی
400	400	400	کلیفرم مدفوعی
3	3	3	سولفید
2	2	2	روی
0.1	0.1	0.1	آرسنیک
0.1	0.1	0.5	سیانید
0.1	0.1	0.1	وانادیوم
10	10	10	روغن گریس
0	0	0	مواد رادیواکتیو
2	2	2.5	فلوراید
1	1	1	سرب

در کانادا شاخص کیفیت آب برای کاربردهای مختلف محاسبه می‌شود که این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

- شاخص کیفیت آب برای مصارف شرب، تفریحی، آبیاری و مصارف دامی
- شاخص کیفیت آب برای حیات آبیان و کاربری حیات‌وحش
- شاخص کلی کیفیت آب برای حفظ سلامتی انسان، زیست‌بوم‌های آبی، حیات‌وحش و کاربری‌های دیگر (راهنمای خود پالایی رودخانه‌ها نشریه ۴۸۱)

۲-۵-۴- روش‌های تقریبی:

اساس کار این روش‌ها، روش‌های آماری است به این ترتیب که به کمک روش‌های آزمایشگاهی، غلظت آلودگی در چند نقطه از ناحیه مورد مطالعه تعیین می‌گردد سپس به کمک منحنی توزیع نرمال و سایر روش‌های آماری اقدام به تقریب زنی آلودگی در نقطه مورد نظر می‌شود.

اشاره به این نکته ضروری است که روش‌های تقریبی معمولاً دقیق نیستند و روش‌های آزمایشگاهی هم عموماً پرهزینه هستند. برای تعیین توزیع آلودگی در رودخانه‌ها، روش‌های ریاضی؛ که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌ترند، اما این روش‌های آزمایشگاهی معمولاً به‌عنوان روشی برای صحت سنجی روش‌های ریاضی (روش‌های عددی ریاضی) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۵-۵- روش‌های ریاضی:

مسائل آلودگی‌های محیطی، در رودخانه‌ها، سواحل و هوا را می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی نیز تحلیل کرد. در این نوع مسائل، مجهول C غلظت ماده آلوده‌کننده به‌عنوان یک کمیت عددی فیزیکی است که همان غلظت آلاینده بوده و می‌تواند شوری و یا درجه حرارت آب و غیره باشد.

در حل مسائل مربوط به آلودگی، این موضوع باید مشخص شود که کمیت ماده آلوده‌کننده پایستار است یا خیر. در صورتی که ماده آلوده‌کننده ناپایستار باشد، ماده آلوده در اثر فرآیندهای بیولوژیکی و یا شیمیایی از بین می‌رود (و یا تکثیر می‌شود) و در حالت خاص این پدیده می‌تواند بدون جابجایی و انتشار رخ دهد.

از کمیت‌های ناپایستار می‌توان از تعداد باکتری‌ها در واحد حجم آب نام برد، که در شرایط خاص، به صورت تابع‌نمایی^۱ نسبت به زمان تغییر می‌کند. (افزایش و یا کاهش می‌یابد)[۷]. علاوه بر این باید مشخص شود که چگالی ماده آلاینده با چگالی ماده پذیرنده، یکسان است یا خیر.

بنابراین با توجه به پایداری، چگالی و نوع ماده آلاینده (نقطه ای-غیرنقطه ای، لحظه ای-پیوسته) حالت‌های مختلف و متنوعی وجود خواهد داشت که در ادامه به برخی از این حالات اشاره خواهد شد.

۲-۵-۵-۱- آلودگی با چگالی یکسان آلاینده و محیط پذیرنده:

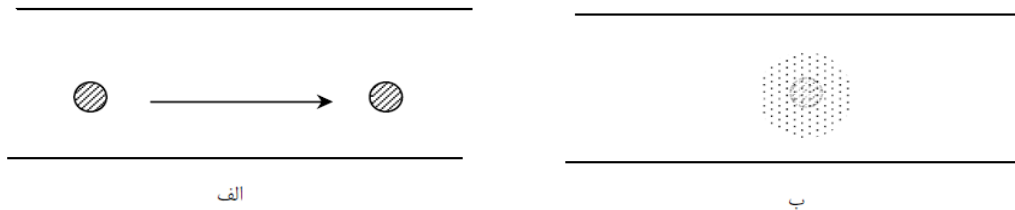
یک جسم سیال (سیال دریافت‌کننده) را در نظر بگیرید که حجم کوچکی از یک سیال ثانوی «ردیاب» به درون آن تزریق می‌شود. فرض می‌شود که چگالی سیال ردیاب با چگالی سیال دریافت‌کننده برابر باشد، بنابراین به‌طور خنثی شناور است. حتی اگر سیال دریافت‌کننده در حال سکون باشد، در اثر «انتشار مولکولی» به تدریج ردیاب پخش خواهد شد. میزان انتشار به شدت آهسته خواهد بود. برای مثال در حدود ۲۴ ساعت طول خواهد کشید تا یک ماده رنگی به قطر چند میلی‌متر که به درون آب تزریق شده در محیطی به قطر یک متر پخش شود. اگر بدنه‌ی سیال دریافت‌کننده در حال جریان باشد و عدد رینولدز به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، آنگاه جریان متلاطم است که این مکانیسم قدرتمندی را برای انتشار ردیاب به وجود می‌آورد. اگر ماده رنگی در نقطه‌ای به جریان متلاطم تزریق شود، این ماده تحت دو فرایند مشخص قرار خواهد گرفت:

- ماده رنگی با سرعتی قابل قیاس با سرعت جریان انتقال می‌یابد. (انتقال افقی^۲) شکل (۲-۲)
- قسمت الف.

^۱ Exponential Decay

^۲ Advection

- ماده رنگی بر اثر تلاطم جریان مخلوط خواهد شد (انتشار ۱) بنابراین ردیاب بیشتر رقیق خواهد شد و کره تأثیر آن هم بزرگ تر خواهد شد. شکل (۲-۲) قسمت ب.



شکل (۲-۱) - فرایند انتشار

انتشار ناشی از تلاطم دو تا چند برابر بیشتر از انتشار مولکولی است. از ترکیب حالات انتقال و انتشار، پراکندگی ایجاد می شود [۷].

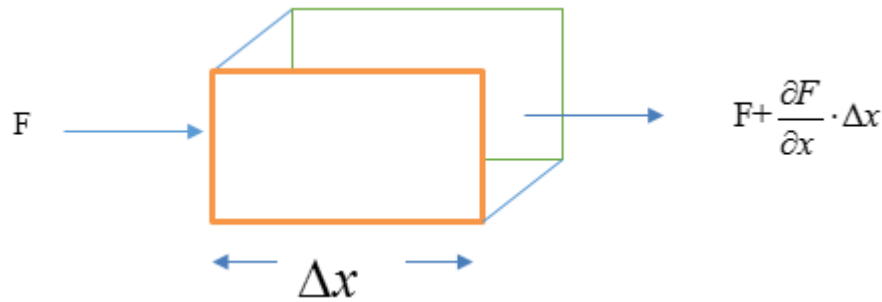
۲-۵-۵-۲- مدل ریاضی پدیده انتقال - انتشار:

اصل بقا جرم در مورد یک کمیت پایدار که در آب محلول^۲ و یا به صورت معلق^۳ است برای یک حجم محدود به طول و مساحت واحد عمود بر جهت جریان به صورت معادله زیر بیان می شود. (سیال ساکن است) (شکل (۲-۲)) [۱۷].

^۱ Diffusion

^۲ Diluted

^۳ Suspended



شکل (۲-۲) - اصل بقا جرم در مورد یک کمیت پایدار

$$\frac{\partial C}{\partial t} \cdot \Delta x + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \Delta x = 0 \quad (۱-۲)$$

C غلظت ماده مورد نظر و F شار جرمی در جریان است که به واسطه انتشار مولکولی جابه جاشده است. جمله اول بیانگر تغییرات زمانی غلظت در داخل حجم کنترل و جمله دوم اختلاف ورودی و خروجی جرم به حجم کنترل است. به عبارت دیگر معادله (۱-۲) مبین آن است که جمع جبری تغییرات جرمی در یک حجم محدود در واحد زمان و اختلاف جرم ورودی و خروجی صفر است. پخش مولکولی جرم بر اساس قانون فیک^۱ به صورت زیر است [۷].

$$F = -D_m \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (۲-۲)$$

به عبارت دیگر شار جرمی محلول (جرمی که در واحد زمان از واحد مساحت می گذرد) در جهت محور X متناسب با گرادیان غلظت ماده محلول در آن جهت است. در رابطه فوق F، شار جرمی (جرم تقسیم بر حاصل ضرب مساحت در زمان)، C غلظت ماده در محلول (جرم تقسیم بر زمان) و D_m ضریب پخش مولکولی (مساحت تقسیم بر زمان) است.

علامت منفی به دلیل آن است که ماده از قسمت با غلظت زیاد به قسمت با غلظت کم جاری می شود

[۷]

با جایگذاری رابطه (۲-۲) در (۱-۲) خواهیم داشت:

^۱ Fick's Law

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3-2)$$

در صورتی که سیال در جهت X با سرعت ثابت u در حرکت باشد، مقدار فلاکس جرمی شامل دو جمله می شود:

$$F = u.C + \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4-2)$$

در رابطه فوق جمله اول انتقال محض^۱ و جمله دوم انتشار^۲ است.

با جایگذاری رابطه (۴-۲) در رابطه (۱-۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (5-2)$$

در صورتی که جریان دائمی و یکنواخت باشد (u=cte) و پخش نیز همگن باشد، (D=cte) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6-2)$$

این معادله را معادله برگرز (۱۹۴۸) نیز می نامند [۱۸].

رابطه (۵-۲) را به سادگی می توان در سه بعد نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z C) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7-2)$$

^۱ Advection Flux

^۲ Diffusion Flux

واضح است اگر پخش ایزوتروپیک و همگن باشد رابطه (۷-۲) به شکل زیر خلاصه خواهد شد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] \quad (۸-۲)$$

در دو رابطه قبل X و Y و Z سه جهت محور مختصات و u_x, u_y, u_z سرعت سیال در سه جهت هستند. D نیز ضریب پخش طولی است.

۲-۵-۲-۱- ضریب پراکندگی طولی :

بررسی دقیق تغییرات غلظت آلاینده‌ها در رودخانه‌های طبیعی با استفاده از مدل‌های یک‌بعدی انتقال-انتشار نیازمند انتخاب ضریب پراکندگی طولی مناسب است. به علت پیچیده بودن فرآیند پخش آلودگی و جریان در رودخانه‌های طبیعی، محاسبه‌ی دقیق این ضریب بسیار مشکل است و اغلب با استفاده از روابط تجربی تعیین می‌شود که استفاده از این روابط در برخی شرایط با نتایج خوبی همراه بوده ولی تعمیم آن‌ها برای کلیه شرایط هندسی و هیدرولیکی دشوار است. لازم به ذکر است که تمامی این روابط، ضریب پراکندگی طولی را با استفاده از متغیرهای مربوط به شرایط متوسط جریان در مقطع رودخانه محاسبه می‌نمایند. این پارامترها عبارت‌اند از: عمق متوسط جریان (U) و سرعت متوسط برشی (U^*) اشاره نمود. چند مورد از این روابط تجربی در جدول (۲-۲) بیان شده است [۱۹]:

جدول (۲-۲)-محاسبه ضرایب پراکندگی طولی [۱۹]

$D = 5.93H \cdot U^*$	رابطه الدر	(۹-۲)
$D = 0.011 \frac{U^3 W^2}{HU}$	رابطه فیشر	(۱۰-۲)
$D = 0.55 \frac{BU^*}{H^2}$	رابطه لیو و چین	(۱۱-۲)
$D = 10.612HU \cdot \frac{U}{U^*}$	رابطه کاشفی پور و فالکونر	(۱۲-۲)

۲-۵-۳- شرایط مرزی:

برای آنکه یک معادله دیفرانسیل جواب منحصر به فردی داشته باشد باید شرایط حدی و اولیه مشخصی داشته باشد. شرایط حدی مختلفی برای معادله انتقال-انتشار می توان فرض کرد که اهم آن ها به شرح زیر است. [۱۷].

- مرز منعکس کننده یا مرز با دیواره جامد یا انعکاسی: در این حالت نرخ انتقال جرم در واحد سطح از مرز وجود ندارد.

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (۹-۲)$$

- مرز جاذب: در این حالت اگر جذب به صورت کامل باشد، مقدار غلظت در مرز صفر است یعنی:

$$C = 0$$

- مرزهای انعکاس دهنده و جذب کننده: مقدار غلظت یا شار $\left(-D \frac{\partial C}{\partial x}\right)$ در مرز تعریف شده است.

۲-۵-۴- حل تحلیلی معادله انتقال - انتشار:

روش های حل تحلیلی برای حل معادلات انتقال-انتشار معمولاً به حل مسائل ساده با ضرایب ثابت محدود می شود، علت این امر متغیر بودن پارامترهای سرعت و ضریب پخش طولی و رژیم ناپایدار در جریان های رودخانه ای و نیز پیچیدگی شرایط اولیه و مرزی است. البته روش های حل معدودی موجودند که می توانند معادلات انتقال-انتشار را با پارامتر سرعت و ضریب پخش طولی متغیر حل کنند، که بسیاری از این روش های حل به حدی پیچیده هستند که عملاً کاربردی نبوده و همچنین به علت شرایط مرزی و اولیه خاص بسیار محدود می شوند [۲۰].

در حقیقت روش های تحلیلی یک ابزار مطمئن و سریع برای ارزیابی صحت نتایج روش های عددی می باشند. در همین زمینه یاداو و همکاران^۱ معادله انتقال - انتشار همراه با ترم مرتبه اول زوال را

^۱. Yadav, R et al.

به صورت تحلیلی حل کردند و مشخص کردند یک آلاینده بعد از گذشت چه مدت زمان و پیمایش فاصله زوال می یابد [۲۱].

چائو و همکاران^۱ یک مدل عددی سه بعدی را برای شبیه سازی پارامترهای کیفی رودخانه مورد مقایسه قرار دادند [۲۲]. و برای ارزیابی مدل مذکور از حل تحلیلی معادله انتقال-انتشار-زوال استفاده کردند. کومار و همکاران^۲ با استفاده از تیدیل لاپلاس، معادله یک بعدی انتقال-انتشار را در حالت غیر ماندگار و با ضریب پخش متغیر حل کردند، و نتیجه گرفتند روش های حل تحلیلی ابزار مناسبی برای صحت سنجی روش های عددی است [۲۳].

برای بررسی میزان انطباق معادلات حاکم و حل عددی و تحلیلی این معادلات با پدیده هایی که در طبیعت اتفاق می افتد، باید آن را با یک مثال واقعی کنترل نمود که برای انجام این مهم، مدل های آزمایشگاهی به دلیل دقت بالا و کنترل پارامترهای دخیل در معادلات حاکم در کالیبره کردن و صحت بخشیدن به مدل های عددی در مواقعی که مطالعات میدانی پرهزینه و زمان بر هستند، به شدت کاربردی هستند. در این زمینه مهاجر و همکاران مدل دوبعدی برای توزیع آلودگی در رودخانه اترک ارائه نمودند که برای صحت سنجی نتایج مدل خود، از نتایج آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت آب و فاضلاب خراسان شمالی استفاده کردند [۸].

۲-۵-۴-۱- حل تحلیلی معادله انتقال - انتشار:

مارسیلی^۳ برای حل تحلیلی معادله انتقال - انتشار با فرض سرعت و ضریب پخش طولی ثابت (معادله (۲-۶)) روش زیر را ارائه داد [۲۴]:

$$0 < x < \infty \quad C(X, 0) = 0 \quad \text{شرط اولیه}$$

$$C(0, t) = C_0 \quad 0 < t < \infty$$

^۱Chao, X. et al.

^۲Kumar, A., D et al.

^۳Marsily, G

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 0 < x < \infty \quad (10-2)$$

با تبدیل لاپلاس گیری از طرفین رابطه (۲-۶) نسبت به زمان، نتیجه زیر حاصل خواهد گردید:

$$(sC - 0) + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (11-2)$$

حال این معادله دیفرانسیل معمولی با ضرایب ثابت به نتیجه زیر منجر می‌شود:

$$C(x, s) = A(s) \exp \left[\frac{ux}{2D} - \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] + \quad (12-2)$$

$$B(s) \exp \left[\frac{ux}{2D} + \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right]$$

با اعمال شرایط مرزی ذکر شده، در رابطه (۲-۱۲) خواهیم داشت:

$$C(x, s) = \frac{C_0}{2} \exp \left[\frac{ux}{2D} - \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] \quad (13-2)$$

بنابراین می‌توان نوشت:

$$C(x, t) = L^{-1} [C(x, s)] = C_0 \exp \left(\frac{ux}{2D} \right) L^{-1} \left[\frac{1}{s} \exp \left[\frac{-x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] \right] \quad (14-2)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس، رابطه (۲-۱۴) به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{d} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (15-2)$$

در رابطه فوق مقصود از erfc تابع خطا بوده و سایر پارامترها مطابق روابط اخیر است. از لحاظ فیزیکی این مسئله در واقع پخش آلودگی را مبدأ رودخانه‌ای نشان می‌دهد که جریان در این رودخانه دارای سرعت u است. بدیهی است که پس از گذشت مدت زیادی از شروع پخش ($t=\infty$) آلودگی در تمام رودخانه پخش شده است.

در مقاله پلاتزمن و بنتمن^۱ (۱۹۷۲)، می‌توان حل دیگری از معادله برگرز یافت. در این مقاله ۳۵ حل دقیق مختلف ارائه شده است [۲۵].

۲-۵-۵-۵- روش عددی حل معادله انتقال - انتشار:

از آنجاکه حل تحلیلی معادله انتقال و پخش برای هندسه‌های پیچیده میسر نیست و یا بسیار مشکل است بسیاری از محققان به حل عددی این معادلات روی آورده‌اند [۲۶].

پار سائی و همکاران (۱۳۹۱) به توسعه مدل عددی برای حل معادله انتقال - انتشار به روش حجم محدود پرداختند و برای تأیید کارایی نتایج حل عددی خود را با حل تحلیلی معادله حرکت مقایسه نمودند و در نهایت به دو نکته مهم: ۱- انتخاب مدل مناسب عددی و ۲- تخمین مناسب ضریب پخش در مدل‌سازی انتقال آلودگی اشاره کردند و برای پیش‌بینی ضریب پخشیدگی از روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها کمک گرفتند [۲۷]. روش‌های عددی با استفاده از گسسته کردن میدان و تعریف این میدان بر اساس یک شبکه از گره‌ها به دست می‌آید. استفاده از این روش برای به دست آوردن جواب چنین معادلاتی کمک زیادی است، چنانچه امروزه به پاسخ بسیاری از این معادلات دست یافته‌اند. در واقع روش‌های عددی ابزار مناسبی برای پیش‌بینی فرآیندهای انتقال آلودگی را فراهم می‌کنند.

در حالت کلی برای مدل‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار باید مراحل زیر طی شوند [۸]:

- تعریف هندسه و محدوده موردنظر
- انتخاب پدیده‌های فیزیکی موردنظر
- تعریف ذرات در میدان حل
- تولید شبکه
- تشخیص و تعریف شرایط مرزی^۲
- تعریف شرایط اولیه

^۱ Benton, E. R., & Platzman, G. W

^۲ Boundary Condition

• اجرای شبیه‌سازی موردنظر

• ارزیابی و صحت‌سنجی

۲-۶- مطالعات پیشین در حوزه‌ی آب‌شکن:

۲-۶-۱- مطالعات آزمایشگاهی

ادگارد و نیروی^۱ (۱۹۹۸)، مطالعات آزمایشگاهی را بر روی هیدرولیک جریان در آبگیرهای ۹۰ درجه انجام دادند. آزمایش‌ها در فلوم دارای سیستم گردش آب به طول ۱۸/۳ متر، عرض ۱/۲ متر و عمق ۰/۶ متر و کانال آبگیر به عرض و عمق ۰/۶ متر با آب صاف انجام شده است. کانال اصلی با دو بستر صاف و زبر ساخته شده و الگوی جریان، خط جدایی جریان، ناحیه سکون و ناحیه تشکیل گردابه‌ها بررسی شده است. با افزایش نسبت سرعت در کانال آبگیر به کانال اصلی، قدرت جریان چرخشی در ناحیه تشکیل گردابه افزایش می‌یابد [۲۸].

کهنل و همکاران^۲ (۱۹۹۹)، نشان دادند که برای آب‌شکن‌هایی با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه با دو نسبت تنگ‌شدگی ۰,۱۲۵ و ۰,۲۵ در یک کانال آزمایشگاهی، کمترین فرسایش بستر، در ناحیه‌ی نزدیک جداره به آب‌شکن با زاویه‌ی ۹۰ درجه و بزرگ‌ترین حجم آب شستگی به آب‌شکن با زاویه ۱۳۵ درجه تعلق دارد [۲۹].

سوخودولو و همکاران^۳ (۲۰۰۱)، به بررسی انواع الگوهای جریان و گردابه‌هایی که در رودخانه‌های دارای آب‌شکن ایجاد می‌شود، پرداختند. نتایج نشان داد که الگوی سرعت در قسمت‌های دارای آب‌شکن به‌طور عمده به نسبت بین طول آب‌شکن و فاصله‌ی بین دو آب‌شکن بستگی دارد. هنگامی که این نسبت بیش از ۰,۵ باشد الگوی جریان شامل یک گردابه و هنگامی که کمتر از ۰,۵ باشد، الگوی جریان شامل دو گردابه است [۳۰].

^۱ Neary, V. S. and Odgaard, A. J.

^۲ Kuhnle, R.A *et a.*

^۳ . Sukhodolov, A et al.

ویجتیوال^۱ (۲۰۰۶)، یک سری مطالعات آزمایشگاهی به منظور پیدا کردن یک طرح جایگزین کارآمد، از لحاظ فیزیکی، اقتصادی و زیست محیطی برای آبشکن‌های استاندارد مورداستفاده در رودخانه‌های بزرگ اروپا انجام داد [۳۱].

کلز و آزینفر (۲۰۰۹)، به بررسی مقاومت جریان ناشی از حضور آبشکن منفرد در کانال پرداختند. یک روش برای بررسی مقاومت جریان در واقع تعبیه کردن یک آبشکن در کانالی با کف صلب و اندازه‌گیری نیروی درگ وارد بر آبشکن است. ایشان ضریب درگ (CD) را محاسبه نموده و نتیجه گرفتند هم برای آبشکن مستغرق و هم غیرمستغرق، نیروی درگ با افزایش دبی جریان افزایش یافته، لیکن این افزایش نیرو در مورد آبشکن باحالت غیرمستغرق بیشتر خواهد بود [۳۲].

آکاهوری و همکاران^۲ (۲۰۱۱)، تحقیقاتی آزمایشگاهی برای بررسی و مطالعه خصوصیات جریان و نرخ انتقال رسوب معلق در یک کانال باز با آبشکن نفوذپذیر انجام دادند. هدف آن‌ها از این تحقیق بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان آبشکن‌های نفوذپذیر و مقایسه آن‌ها با آبشکن‌های نفوذناپذیر بود. ایشان دریافتند غلظت رسوبات معلق در حرکت به سمت پایین دست به علت رسوب گذاری در منطقه گذار، کاهش یافته و این به یک توزیع ثابت در پایین دست جریان در منطقه تعادل ختم می‌شود [۳۳].

پینگ چن و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی آزمایشگاهی و سپس عددی انتقال آلودگی در اطراف آبشکن در یک کانال به طول ۱۴ متر پرداختند. ایشان در بررسی خود آبشکن‌هایی با زوایای متفاوت ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه را به کار بردند و با مطالعه جریان اطراف آبشکن و تخلیه آلاینده نقطه‌ای در هر یک از مدل‌ها نتایج قابل قبولی را بین مدل آزمایشگاهی و عددی به دست آوردند [۳۴].

^۱ Uijttewaal W.S.J

^۲ Akahori, R et al.

کانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۳)، به بررسی اکوسیستم‌های احتمالی شکل گرفته حاصل از وجود آب‌شکن‌ها در بستر رودخانه‌ها پرداختند و گزارش دادند که رسوبات ته‌نشین شده در میان آب‌شکن‌ها باعث کشت شدن گیاهان شده و باعث ایجاد یک ناحیه جریان ساکن برای اکوسیستم شده که به صورت یک منطقه مناسب برای زندگی برای آبزیان و رشد و نمو برخی گیاهان عمل می‌کند [۳۵].

گو و همکاران^۲ (۲۰۱۶)، به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان در اطراف گروه آب‌شکن‌ها در رودخانه‌های شهری پرداختند و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی را برای یافتن بهترین روش عددی در مدل‌سازی جریان به کار گرفتند. ایشان آب‌شکن‌های با طول‌های متفاوت را در کناره کانال تعبیه نموده و مدل‌های آشفتگی گردابه‌های بزرگ، تنش‌های رینولدز و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ منحنی‌های سرعت را به دست آورده و با یکدیگر مقایسه نمودند، مقایسه روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی نشان داد ارائه سطح جزئیات در مدل‌های آزمایشگاهی غالباً بیشتر بوده، لیکن از بین مدل‌های آشفتگی، مدل LES به کار گرفته شد [۳۶].

۲-۶-۲- مطالعات عددی

صفر زاده و صالحی نیشابوری (۱۳۸۳)، در اولین کنگره ملی مهندسی عمران به بررسی مدل‌سازی عددی الگوی سه‌بعدی جریان در آبگیر جانبی پرداختند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار Fluent میدان جریان سه‌بعدی برای آبگیر جانبی واقع در یک مسیر مستقیم به صورت عددی و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد حل شد. مقایسه نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که این مدل عددی قابلیت پیش‌بینی الگوی سه‌بعدی مزبور را دارد ولی ابعاد ناحیه گردابی ایجادشده در داخل آبگیر، کوچک‌تر از ابعاد اندازه‌گیری شده است [۳۷].

^۱ Kang, J et al.

^۲ Gu, Z., Cao, X et al.

حسن‌زاده و همکاران (۱۳۸۶)، با استفاده از معادلات ناویه استوکس متوسط گیری شده در عمق و حل عددی روش ADI، به تهیه مدلی برای شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف آب‌شکن پرداختند و نتایج حاصله را با نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اتما و موسته^۱ مورد مقایسه قرار دادند. مقایسه ایشان نشان داد که طول منطقه جداشدگی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی تقریباً یکی بوده ولی مدل عددی، عرض منطقه جداشدگی را کوچک‌تر از مدل آزمایشگاهی تخمین می‌زند [۳۸].

غال دربندی و همکاران (۱۳۸۷)، به بررسی الگوی جریان در اطراف آب‌شکن‌های مستغرق و غیرمستغرق پرداخته و برای مدل‌سازی هندسه میدان جریان و آب‌شکن از محیط پیش پردازنده گمبیت استفاده نمودند. تحلیل و آنالیز میدان جریان در اطراف آب‌شکن در نرم‌افزار Fluent، انجام گرفته و مدل‌های آشفته‌گی به کاررفته شده نتایج قابل قبولی را به اثبات رساند [۳۹].

الیاسی و اقبال زاده (۱۳۹۱)، به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و سطح آزاد در اطراف یک آب‌شکن مستغرق در کانال مستقیم شیب‌دار با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند، شبیه‌سازی سطح آزاد در تحقیق ایشان به روش VOF صورت پذیرفته و از مدل آشفته‌گی RNGK-E برای بستن معادلات ناویه استوکس استفاده شد. نتایج کار ایشان نشان داد که افزایش طول آب‌شکن موجب بالا رفتن سرعت بر روی دماغه آب‌شکن می‌گردد در حالی که کاهش طول آن، باعث کاهش سرعت جریان می‌شود [۴۰].

اولین و دارتوس^۲ (۱۹۹۷)، به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان اطراف آب‌شکن پرداخته و الگوریتم‌های مک کور مک را برای مدل‌سازی به کار گرفتند. مقایسه نتایج مدل عددی ایشان با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان داد، علاوه بر پیش‌بینی سطوح آب در ترازهای متفاوت، به بررسی میدان تنش برشی نیز پرداختند و ایشان نشان دادند، میدان تنش برشی کف در مدل ایشان تطابق خوبی با همان پدیده انتقال رسوب حاصل از کار تانگوی (۱۹۸۹) داشت [۴۱].

^۱ Etmaa A & Muste, J.D

^۲ Ouillon, S., & Dartus, D

زولین و همکاران^۱ (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل آشفتگی LES به شبیه‌سازی جریان در اطراف آب‌شکن منفرد غیر مستغرق پرداختند. ایشان دریافتند جریان بزرگی در پشت آب‌شکن ایجاد می‌شود که علت آن خود آب‌شکن بوده، و توزیع سرعت‌ها تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. گردابه‌های دیگری که در جلو و پشت آب‌شکن شکل گرفته نیز توسط مدل LES به خوبی شبیه‌سازی شده و ماهیت سه‌بعدی بودن جریان در مجاورت آب‌شکن را به خوبی نشان داد [۴۲].

باصر و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی عددی طول آب‌شکن بر خصوصیات جریان اطراف آن، پرداختند. آن‌ها طول‌های متفاوت برای آب‌شکن در نظر گرفته و با استفاده از نرم‌افزار *ssim* به مدل‌سازی آب‌شکن پرداختند و نتایج حاصل از مدل عددی خود را با داده‌های آزمایشگاهی حاصل در آزمایشگاه محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی امیرکبیر مقایسه کردند. همچنین تحلیل حساسیت را بر روی مدل‌های آشفتگی K-ε استاندارد و RNG K-ε انجام دادند و نتیجه گرفتند که مدل K-ε استاندارد نتایج نزدیکی به نتایج آزمایشگاهی دارد [۴۳].

کافله^۲ (۲۰۱۲)، جریان اطراف آب‌شکن را به صورت عددی شبیه‌سازی نمود. در مدل وی از دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از مدل عددی *Nays 2D* استفاده شده است. وی بیان کرد جریان اطراف آب‌شکن به علت ماهیت پیچیده‌ای که دارد به صورت کاملاً سه‌بعدی است اما از آنجاکه انتخاب رویکرد آشفتگی، تغییر هندسه به علت فرسایش و رسوب‌گذاری وجود دارند، بنابراین رویکردی دوبعدی به‌عنوان جایگزینی مناسب در مدل‌سازی قابل به‌کارگیری خواهد بود. برای اطمینان از صحت نتایج چندین بار آنالیز مش در مدل ایشان استفاده شده است که در نهایت مش بندی نهایی در جهت طولی با اندازه گام ۰,۰۱ متر و در جهت عرضی اندازه گام ۰,۰۳ متر است. راج دریافت که مدل به مقادیر ضریب زبری

^۱ . *Xin, Y*

^۲ *Kafle, M. R*

مانینگ حساسیت زیادی نشان داده و مقادیر سرعت متناسب با عکس ضریب زبری خواهد بود، یعنی مقادیر بیشتر ضریب زبری باعث حصول مقادیر سرعت حاصله کمتر خواهد بود و بالعکس [۴۴].

فانگ و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به بررسی اثر سری آب‌شکن‌ها، بر جریان پیرامونی سازه پرداختند. در مدل عددی به‌کاررفته شده توسط ایشان، پارامترهای آب‌شکن نظیر شکل نوک آب‌شکن، نسبت طول به ضخامت آب‌شکن و.. در نظر گرفته شد. نتایج مدل عددی نشان داد که در آب‌شکن‌های باحالت نوک مستطیلی شکل آشفتگی به‌مراتب شدیدتری نسبت به آب‌شکن‌های با نوک منحنی ایجاد می‌کنند. همچنین مشخص شد طول آب‌شکن اثرات فراوان بر ناحیه چرخش مجدد در اطراف آب‌شکن دارد [۴۵].

شاه جهان و همکاران (۲۰۱۷)، به شبیه‌سازی عددی جریان آشفته در اطراف آب‌شکن منفرد پرداختند. ایشان با استفاده از نرم‌افزار Nays-2DH و با استفاده از مدل‌های دوبعدی آب‌شکن‌هایی با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه را مدل‌سازی کردند. نتایج عددی پژوهش ایشان نشان داد حداکثر سرعت و تنش برشی کف در حالتی که نسبت $Y/L=1$ باشد حاصل می‌شود که پارامتر L ، همان طول آب‌شکن است. همچنین مشخص گردید، حداکثر سرعت و تنش برشی کف برای آب‌شکن با زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به آب‌شکن‌های با زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه به‌مراتب کمتر است [۴۶].

فصل سوم :

معرفی نرم افزار FLOW-3D

۳-۱- مقدمه

این فصل شامل دو بخش است، که بخش اول مقدمه‌ای بر علم CFD، معادلات حاکم بر انتقال - انتشار و در ادامه، مشخصات مدل‌ها و چگونگی انجام مدل‌سازی به همراه محدوده پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات هندسی مدل‌های مختلف و نحوه استخراج روابط ارائه و توضیح داده می‌شود. بخش دوم معرفی نرم‌افزار Flow - 3d، معادلات حاکم بر جریان آشفته، انواع مدل‌های آشفتگی به همراه مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار را شامل می‌گردد.

دینامیک سیالات محاسباتی و یا به اختصار CFD علمی است که به مطالعه عددی پدیده‌های موجود در سیالات نظیر انتقال حرارت و پدیده‌های نظیر واکنش‌های شیمیایی، بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری می‌پردازد. شاید بتوان ادعا کرد که پیدایش رایانه‌ها، با کاهش هزینه‌های محاسباتی استفاده از روش‌های عددی، تأثیر زیادی در پیشرفت این علم داشته و باعث شده است روزبه‌روز بر تعداد روش‌های حل عددی و مدل‌های توسعه داده‌شده بر مبنای این روش‌ها افزوده شود.

مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی جریان سیال که مبتنی بر CFD هستند در مقایسه با روش‌های تجربی دارای چندین مزیت عمده هستند:

- کاهش اساسی در زمان و هزینه‌های طراحی
- افزایش توان مطالعه دستگاه‌های پیچیده که انجام آزمایش‌های کنترل‌کننده روی آن‌ها مشکل و یا غیرممکن است. (نظیر سیستم‌های بسیار بزرگ)
- افزایش سطح جزئیات در ارائه نتایج

البته استفاده حرفه‌ای از مدل‌های ریاضی نیز دارای مسائل و مشکلاتی نظیر واسنجی مدل، انتخاب معادلات حاکم و روش‌های شبیه‌سازی مناسب، استفاده از شماهای عددی مناسب و غیره است. ساختار برنامه‌های CFD روش عددی است، به طوری که مسائل جریان سیال با استفاده از این روش قابل حل می‌باشند. به منظور فراهم آمدن دسترسی آسان به توان حل آن‌ها، تمام بسته‌های نرم‌افزاری تجاری

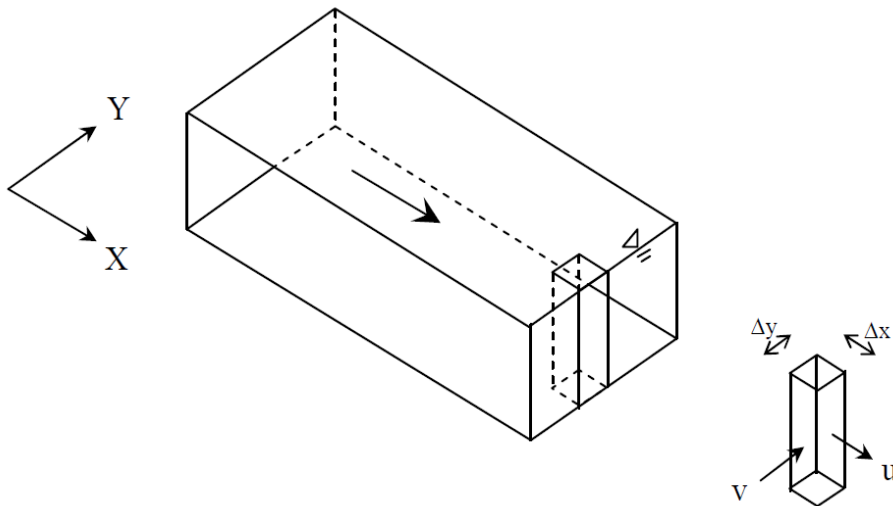
CFD شامل واسطه‌های کاربری پیچیده‌ای جهت ورود پارامترهای مسائل و تحلیل نتایج می‌باشند.

از این رو تمام برنامه‌ها شامل سه جز اصلی می‌باشند:

- پیش پردازنده
- حل کننده
- پس پردازنده

۳-۲- معادله کلی حاکم بر پدیده انتقال - انتشار:

حجم کنترل شکل (۳-۱) را در نظر بگیرید.



شکل (۳-۱) - نمایش حجم کنترل در نظر گرفته شده

با در نظر گرفتن حجم کنترل فوق، قانون فیک و انتشار عرضی، معادله حاکم بر پدیده توزیع آلودگی

در دو بعد به صورت زیر است: [۴۷].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(D_{yx} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] + hD_k C \\ & + \delta(x - x_s) \cdot (y - y_s) Q(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

در فرمول فوق:

C : غلظت آلاینده

v, u : سرعت جریان سیال در جهت محورهای

D_{yy}, D_{xx} : ضریب پخش طولی در جهت جریان

D_{yx}, D_{xy} : ضریب پخش عرضی عمود بر جهت جریان

$Q(t)$: دبی چشمه آلوده کننده

δ : دلتای دیراک

(X_s, Y_s) : مختصات چشمه آلوده کننده

D_k : ضریب زوال

h : عمق جریان

در فرمول فوق از نکات قابل توجه، سرعت‌های u و v هستند، بدین دلیل که u و v برای حجم کنترل در نظر گرفته شده مقادیر متوسط هستند. به بیان دیگر امکان دارد u و v نسبت به h متغیر باشند، که در صورت در نظر گرفتن این ویژگی، معادله به صورت سه بعدی درمی آید.

لازم به ذکر است که δ پارامتر ریاضی است و به صورت زیر قابل توضیح است:

در صورتی که عبارت داخل پرانتز برابر صفر باشد مقدار δ برابر واحد است و از نظر دیمانسیون، بی بعد است. لذا با توجه به این تعریف، این ترم که به چشمه معروف است را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

^۱ Dirac Delta

$$\delta(x - x_s) \cdot (y - y_s) Q(t) = S_{i,j}(t) \quad (2-3)$$

به صورتی که برای یک گره مانند گره (i,j) در صورتی که چشمه آلوده کننده‌ای وجود داشته باشد، می‌توان هیدرو گراف ورودی آن را با $S_{i,j}(t)$ بیان نمود. برای بحث بیشتر در مرجع [۴۷].

۳-۳- حل عددی معادله حاکم:

معادله دیفرانسیل حاکم بر پدیده توزیع اسکار C در محیط سیال، همان گونه که تاکنون به دست آمده، به صورت زیر قابل بیان است:

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(D_{yy} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \quad (3-3)$$

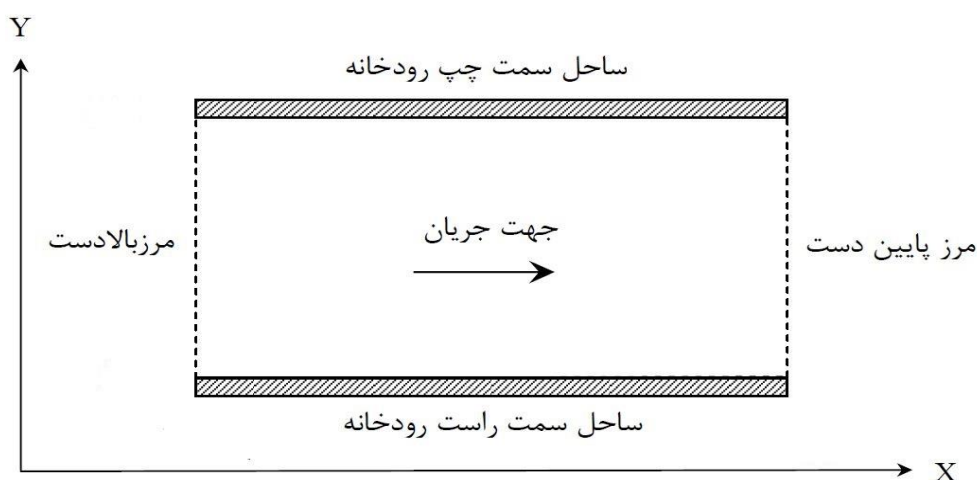
$$+ h D_k C + S_{i,j}(t)$$

مقادیر h ، C ، u و v نسبت به زمان و مکان متغیر می‌باشند. این بدان معنی است که جریان سیال می‌تواند غیریکنواخت، ماندگار و یا غیر ماندگار باشد. به بیان دیگر معادله (۳-۳) بر پخش آلودگی در جریان‌های غیردائمی و غیریکنواخت نیز صادق خواهد بود.

نکته قابل توجه این است که در حل عددی معادله (۳-۳) تنها کمیت اسکالر C قابل محاسبه است و باید تغییرات h ، u و v را نسبت به مکان و زمان از معادلات دیگری یافت.

۳-۴- شرایط مرزی:

چنانچه فرض نماییم شرایط رودخانه همانند شکل (۲-۳) باشد، در آن صورت تنها وجه شرقی سلول‌های سمت راست شرایط پایین دست و تنها وجه غربی سلول‌های سمت چپ شرایط بالادست را خواهند داشت. قابل ذکر است تمامی وجوه سلول‌ها می‌توانند شرایط مرز دیواره را داشته باشند [۴۸].

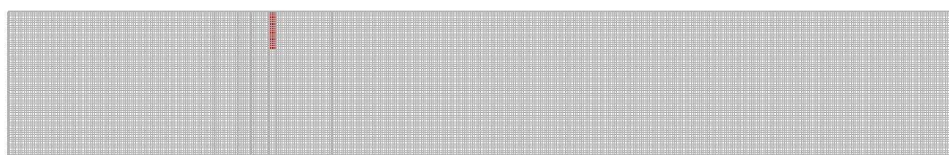


شکل (۳-۲) - شرایط مرزی مختلف در معادله انتقال - انتشار

۳-۵ - نحوه مدل سازی جریان

در مدل سازی آنچه از همه موارد مهم تر است یافتن فن مدل سازی است، در این پژوهش مدل سازی به دو قسمت تقسیم شده است، قسمت اول به مدل سازی جریان اطراف سازه آب شکن می پردازد و قسمت دوم منبع آلودگی تعریف شده و انتقال - انتشار منبع ورودی بررسی می شود. در هر پژوهش عددی همواره این سؤال وجود خواهد داشت که نتایج حاصل شده صحیح است یا خیر؟ پس بایستی تمامی خروجی حاصل از مدل سازی صحت سنجی گردد لذا در مرحله اول نمودارهای مربوط به مقاله جدا گردیده و آماده صحت سنجی می شود.

ابتدا قلمرو حل مشخص می گردد، سپس سازه آب شکن ایجاد شده و مدل سازی جریان اطراف سازه آغاز می شود.



شکل (۳-۳) - نمایش محیط فیزیکی مسئله در مدل سازی

۳-۵-۱- معرفی نرم افزار FLOW-3D

نرم افزار FLOW-3D یک نرم افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که توسط شرکت Flow Science, Inc تولید، توسعه و پشتیبانی می شود. این نرم افزار برای تحقیق در رابطه با رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده کاربردی وسیعی طراحی شده است. روش حل معادلات در این نرم افزار بر اساس روش حجم محدود است. این نوع مدل های ریاضی از جمله ابزارهای قدرتمند برای حل معادلات پیچیده در دینامیک سیالات می باشند. امروزه با افزایش سرعت کامپیوترها، استفاده از این مدل ها گسترش چشمگیری یافته است. یکی از قابلیت های عمده این نرم افزار برای آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان های سطح آزاد با روش VOF^۱ است.

مدل FLOW-3D شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آب های کم عمق، لزجت، کاپیتاسیون، آشفتگی، محیط های متخلخل و غیره است. این مدل در زمینه هایی چون ریخته گری، مهندسی فرآیند، هیدرولیک، محیط زیست، هواضا، علوم دریایی، نفت، گاز و غیره کاربرد دارد. شبکه حل در این مدل متشکل از سلول های مکعب مستطیلی است. شاید در نگاه اول به عنوان یک محدودیت مطرح شود، در صورتی که، اولاً به دلیل تولید آسان این شبکه، نظم مناسب و نیاز به حافظه کمتر در آن و ثانیاً به دلیل به کارگیری دو ابزار مفید VOF و FAVOR در مدل FLOW-3D، شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود. به دلیل قابلیت هایی که مدل FLOW-3D در زمینه ی شبیه سازی های هیدرولیکی دارد و جواب های قابل قبول که در این زمینه تولید کرده است، اخیراً کاربرد زیادی در این زمینه پیدا کرده است. یکی از قابلیت های این برنامه در زمینه ی آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش حجم سیال یا VOF در مدل کردن جریان های با سطح آزاد است که مسائل موجود در روش های قبلی (روش های مبتنی بر آزمون و خطا) را برطرف کرده است. شناخت ساختار کلی و عملکرد برنامه برای کار با نرم افزاری که امکانات مدل سازی را برای مسائل مختلف فیزیکی فراهم می سازد، مسئله ای اساسی است. در این قسمت، سعی در آشنا نمودن مقدماتی کاربر با این نرم افزار و ساختار آن می شود. در هر

^۱ Volume of Fluid

یک از نمونه‌های موردنظر ابتدا صورت مسئله‌ای مطرح شده، سپس با معرفی دستورها و بخش‌های مختلف مدل‌سازی در نرم‌افزار، گام‌های لازم برای شناخت چگونگی مدل‌سازی مسئله موردنظر بیان می‌گردد. فرآیند حل مسئله به کمک سه مرحله‌ی پیش‌پردازش، اجرا و سپس پردازش صورت می‌گیرد.

در خودآموز نرم‌افزار FLOW-3D نمونه‌های مختلفی از مسائل، به‌منظور آموزش مدل‌سازی شرایط مختلف شامل حالت‌های سیال، هندسه و نوع جریان و همچنین انواع شرایط مرزی آورده شده است که موارد استفاده از هر یک از حل‌گرهای موجود در نرم‌افزار مذکور را به‌خوبی نشان می‌دهد. در این پژوهش ابتدا بایستی بر اساس روابط ارائه‌شده، نوع رژیم جریان را مشخص کرد و سپس بر اساس آن نوع حل‌گر مناسب در این نرم‌افزار را تعیین کرد. به همین منظور در ادامه ابتدا به بیان روابط حاضر در تعیین رژیم جریان، پرداخته می‌شود و سپس به بررسی مسائل خاص در آشفتگی پرداخته خواهد شد [۴۹].

این نرم‌افزار با استفاده از تقریب احجام محدود معادله‌های حاکم بر حرکت سیالات را حل می‌کند و همه متغیرها را در مرکز سلول محاسبه می‌کند به‌غیر از سرعت که مقدار آن در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در ادامه به توضیح دو تکنیک VOF و FAVOR می‌پردازیم:

۳-۵-۱-۱- روش حجم سیال (VOF)

این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می‌گردد. در این روش ناحیه‌ای که باید مدل شود، ابتدا به شبکه‌ای از المان‌ها کوچک‌تر و یا حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌شود. برای المان‌های حاوی سیال، مقادیر عددی برای هر کدام از متغیرهای جریان نظیر فشار، دما و سرعت در داخل آن‌ها نگه‌داشته می‌شود.

زمانی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول‌ها پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول‌ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه‌پر هستند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها این است که کمیتی به نام F ، که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است، تعریف شود. این کمیت تابع حجم سیال نامیده می‌شود.

با دانستن مقادیر F می‌توان محل سطح آزاد و زاویه‌ی آن را در میان سلول‌های میدان حل مشخص کرد. این عمل با کنترل کردن مقدار سیال در سلول‌های مجاور انجام‌پذیر است. بخش عمده‌ی سیال در داخل یک سلول سطحی به سلول مجاور با سیال بیشتر نزدیک است. مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچ‌گونه تغییر شکل و جابجایی شبکه وجود ندارد.

۳-۵-۱-۲- روش FAVOR

روش FAVOR یکی دیگر از فنون جز حجمی است که برای تعیین هندسه بکار برده می‌شود. همان‌طور که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال بکار برده می‌شود، یک کمیت جز حجمی دیگر نیز می‌تواند برای تعیین سطح بدنه‌ی صلب استفاده شود. از طرفی، این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه‌ی صلب اشغال نشده است (V_f) نیز استفاده شود. زمانی که، در هر سلول، حجم اشغال‌شده توسط بدنه‌ی صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه‌ی ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، بکار برده می‌شود.

۳-۵-۲- معادلات حاکم بر جریان آشفته

۳-۵-۲-۱- معادله متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS)

برای ساده‌سازی بیشتر، جریان سیال را با خواص ثابت و تراکم ناپذیر فرض می‌شود. معادلات ناویر استوکس برابر با:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۴-۳)$$

(۵-۳)

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

بردارهای u_i و x_i به ترتیب سرعت و موقعیت، t زمان، p فشار و ρ چگالی می‌باشند و t_{ij} تانسور تنش لزجت است، که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (6-3)$$

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

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7-3)$$

توجه کنید که $S_{ji} = S_{ij}$ ، بنابراین $t_{ij} = t_{ji}$ برای سیال‌های لزج می‌باشند. در اینجا با توجه به

معادله (۳-۴۱) (پیوستگی) تابع $u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$ برابر صفر است و با ساده‌سازی بیشتر، معادلات ناویر استوکس

به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij} - \overline{\rho u_j' u_i'}) \quad (8-3)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij}) \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9-3)$$

در ادامه با روش متوسط گیری زمانی معادلات فوق به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (10-3)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij} - \overline{\rho u_j' u_i'}) \quad (11-3)$$

در اینجا گذشته از جایگزینی متغیرهای لحظه‌ای با متغیرهای متوسط، تنها فرق میان متوسط زمانی با

معادلات مومنوم ایستایی عبارت $\overline{u_j' u_i'}$ است. این عبارت نرخ متوسط زمانی انتقال مومنوم ناشی از

آشفته‌گی است. این عبارت، پایه و اساس مسائل آشفته‌گی را تشکیل می‌دهد. برای محاسبه تمامی خواص متوسط جریان آشفته، نیاز به دستورالعملی برای محاسبه $\overline{u_j u_i}$ می‌باشد.

معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱) به‌عنوان معادلات متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS) شناخته می‌شوند. کمیت $-\overline{\rho u_j u_i}$ به‌عنوان تانسور تنش رینولدز تعریف می‌شود و در اینجا با علامت $\rho \tau_{ij}$ نشان می‌دهیم، بنابراین τ_{ij} تانسور تنش رینولدز مخصوص است و برابر است با:

$$\tau_{ij} = -\overline{u_j u_i} \quad (۳-۱۲)$$

در دیدگاه متوسط‌گیری رینولدز در مدل کردن آشفته‌گی نیاز است که تانسور تنش رینولدز به‌درستی مدل شود. روش معمول به‌کارگیری فرضیه بوزینسک با ارتباط دادن تانسور تنش رینولدز با گرادیان‌های سرعت متوسط است:

$$\tau_{ij} = 2\nu_t s_{ij} - \frac{2}{3} K \delta_{ij} \quad (۳-۱۳)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (۳-۱۴)$$

۳-۵-۲-۲- معادله انرژی آشفته‌گی

اگر سه تنش رینولدز نرمال را باهم جمع کنیم و در $0/5$ ضرب کنیم، انرژی جنبشی آشفته تشکیل می‌شود که با علامت K نشان داده می‌شود. بنابراین:

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

$$\tau_{ii} = -\overline{u_i u_i} = -2K \quad (۳-۱۵)$$

شکل معادله دیفرانسیلی برحسب تریس تنش رینولدز به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i' u_j'} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u_j'} \right) \quad (۱۶-۳)$$

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

$$\varepsilon = \nu \frac{\overline{\partial u_i' \partial u_j'}}{\partial x_k \partial x_k} \quad (۱۷-۳)$$

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

$$\frac{1}{2} \overline{u_i' u_i' u_j'} + \frac{1}{\rho} \overline{p' u_j'} = - \frac{\nu_T}{\sigma_K} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (۱۸-۳)$$

در نهایت معادله به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (۱۹-۳)$$

برای بستن این معادله عبارت τ_{ij} با تقریب بوزینسک^۱ (۱۳-۳) به دست می آید.

۳-۵-۳- انواع مدل های آشفتگی

مدل های آشفتگی زیادی توسط محققین مختلف برای شبیه سازی جریان های آشفتگی تدوین شده است.

این مدل ها بر اساس روش عمل و تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای کمیت های آشفتگی به

دسته های مختلفی تقسیم می شوند:

مدل های صفر معادله ای، تک معادله ای، دو معادله ای، دارای معادله تنش و مدل های شبیه سازی

گردابه های بزرگ

^۱ Boussinesq Approximation

۳-۵-۳-۱- مدل های صفر معادله ای

در این مدل ها، برای تعیین کمیت های آشفتگی از معادلات دیفرانسیلی استفاده نمی شود. این مدل ها نسبتاً ساده بوده و بر اساس داده های تجربی و آزمایشگاهی تدوین می شوند. از انواع این مدل ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

مدل های لزجت گردابه ای ثابت، طول اختلاط پراتنل و لایه ی برش آزاد پراتنل

۳-۵-۳-۲- مدل های یک معادله ای

در این مدل ها از یک رابطه ی دیفرانسیلی برحسب کمیت آشفتگی k استفاده می شود. K عبارت است از انرژی جنبشی آشفتگی که به صورت رابطه ی زیر تعریف می شود:

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (۲۰-۳)$$

مقیاس سرعت، v_t ، به صورت زیر تعریف می شود:

$$v_t = \sqrt{k} \quad (۲۱-۳)$$

بنابراین مجهول های آشفتگی به k و l تبدیل می شود. کمیت k با حل معادله ی ناویراستوکس برای این پارامتر قابل تعیین است.

۳-۵-۳-۳- مدل های دو معادله ای

مقیاس طول در این مدل ها، برخلاف مدل های یک معادله ای، بدون تکیه به روابط تجربی برآورد می شود. در این مدل ها، از کمیت های آشفتگی که از حل معادلات دیفرانسیلی استخراج می شوند برای تخمین مقیاس طول و مقیاس سرعت استفاده می شود. از انواع این مدل ها عبارت اند از:

جبری، لزجت گردابه ها و تنش رینولدز غیرخطی

در این مدل ها، کمیت آشفتگی دیگری نیز تعریف شده و مشابه k با استفاده از معادله ی ناویراستوکس

برآورد می شود. از جمله کمیت های تعریف شده در این مدل ها، کمیت اتلاف آشفتگی یا ε (m^2/s^3)

است. کمیت ε نماینده ی مقیاس طول است. در حقیقت، مقیاس طول بیانگر اندازه ی گردابه های بزرگ

دارای انرژی جنبشی است که باعث انتقال آشفتگی در توده ی سیال می شود.

۳-۵-۳-۴- مدل‌های دارای معادله‌ی تنش

این مدل بر پایه‌ی گروه‌های نرمال شده‌ی رینولدز^۱ استوار است. این رویکرد شامل روش‌های آماری برای استحصال معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی نظیر انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن است.

مدل RNG از روابطی نظیر روابط موجود در مدل $k - \varepsilon$ استفاده می‌کند. با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل $k - \varepsilon$ ، که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند.

۳-۵-۳-۵- مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در Flow-3D

شبیه‌سازی آشفتگی در Flow-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط Flow-3D عبارت‌اند از: طول اختلاط پراتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ.

مدل‌سازی آشفتگی در Flow-3D تا حدی از مدل‌سازی‌های قبلی متفاوت است زیرا اثر کسرهای حجمی و سطحی روش FAVOR در معادلات مربوط به مدل‌های آشفتگی اعمال شده است و تولید یا تنزل آشفتگی به وسیله‌ی نیروهای شناوری تعمیم یافته‌اند.

در این پژوهش به منظور ارائه نتایج دقیق و اطمینان از سطح مناسب جزئیات در ارائه نتایج، مدل LES انتخاب گردید لذا در ادامه به شرح این مدل آشفتگی می‌پردازیم.

^۱ Renormalization Groups (RNG)

۳-۵-۳-۶- مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

ایده‌ی اساسی این مدل این است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل‌محاسبه با استفاده از شبکه‌ی محاسباتی هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل‌محاسبه نیستند، تقریب زده شوند. این مدل اطلاعات بیشتری نسبت به روش RNG تولید می‌کند. در مدل LES اثرات آشفتگی که خیلی کوچک هستند و قابل‌محاسبه نیستند با یک لزجت آشفتگی، که متناسب است با یک مقیاس طول ضربدر معیاری از نوسانات سرعت در آن مقیاس، نمایش داده می‌شوند. این روش از یک میانگین هندسی ابعاد سلول شبکه برای مقیاس طول استفاده می‌کند.

معادلات این مدل به‌صورت زیر است:

مقیاس طول:

$$L = (\delta_x \delta_y \delta_z)^{\frac{1}{3}} \quad (۳-۲۲)$$

لزجت گردابی:

$$\nu_T = (cL)^2 \cdot \sqrt{e_{ij} e_{ij}} \quad (۳-۲۳)$$

c ضریب ثابتی در دامنه ۰/۱ تا ۰/۲ است و e_{ij} اشاره به مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش دارد.

۳-۶- مواد مورد استفاده در این پژوهش:

جهت مدل‌سازی مقاطع ارائه‌شده از نرم‌افزار FLOW-3D نسخه‌ی 11.1.1 و از نرم‌افزار FlowSight نسخه‌ی 11.1 برای پس پردازش و واسط گرافیکی در این برنامه استفاده شده است. همچنین جهت اجرای این نرم‌افزارها، سیستم‌عامل‌های Windows 8.1 بر روی رایانه‌ای با مشخصات جدول (۳-۱) به‌کاررفته گرفته شده‌اند.

جدول (۳-۱) - مشخصات رایانه‌ی استفاده‌شده در پژوهش

مشخصات	قطعه‌ی سخت‌افزاری
Intel Core i7-4720HQ. CPU@4.00 GHz	پردازشگر
8 GB	RAM
Gallium 0.4 on llvmpipe	کارت گرافیک

فصل چهارم :

روش تحقیق و مدل سازی

۴-۱- مقدمه

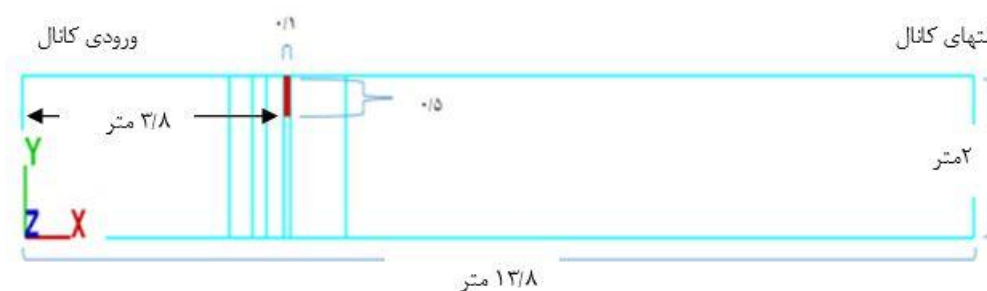
این فصل به دو قسمت کلی تقسیم گردیده است، ابتدا به مدل سازی جریان اطراف آب شکن بدون در نظرگیری آلودگی پرداخته شده و صحت سنجی نتایج مربوطه با استفاده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی ژین و تانگ (۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، صحت سنجی نرم افزار در بحث انتقال آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است و در این مورد از مقاله پینگ و ژیانگ (۲۰۱۰) استفاده شده است.

۴-۲- ظصحت سنجی و دقت عملکرد نرم افزار

۴-۲-۱- مدل سازی جریان اطراف آب شکن بدون ورود آلودگی

در این بخش همانند مدل ژین و تانگ از کانالی مطابق شکل (۴-۱) استفاده می کنیم.

شکل کانال به صورت مقطع مستطیلی است و طول، عرض و ارتفاع آن در سه راستای هم امتداد با محورهای X ، Y و Z به ترتیب برابر با $۱۳/۸$ ، ۲ و $۰/۱۵$ متر است. همچنین آب شکن تعبیه شده در کانال نیز دارای ضخامت (در راستای محور X) برابر $۰/۱$ متر، عرض (راستای محور Y) برابر $۰/۵$ متبوده و ارتفاع آن با ارتفاع کانال برابر است.



شکل (۴-۱)- هندسه کلی کانال در مدل سازی

شرایط کلی مدل سازی نیز در جدول (۴-۱) مشخص شده است

جدول (۴-۱) - شرایط کلی مدل سازی

مقدار	واحد	نشانه	پارامتر
۰,۰۶۶۱	m^3/s	Q_{in}	دبی ورودی
۰,۱۰۲۴	m	h_{in}	ارتفاع آب در مجرای ورودی
۱۳,۸	m	L_x	طول کانال در راستای X
۲	m	L_y	عرض کانال در راستای y
۰,۱۵	m	L_z	ارتفاع کانال در راستای Z
۳,۸	m	L	فاصله آبشکن از ابتدای کانال
۰,۱	m	d_1	ضخامت آبشکن در راستای X
۰,۵	m	d_2	طول آبشکن در راستای y
۰,۱۵	m	d_3	ارتفاع آبشکن در راستای Z
۰,۰۳	m	$\Delta x, \Delta y$	ابعاد شبکه بندی در راستای x و y

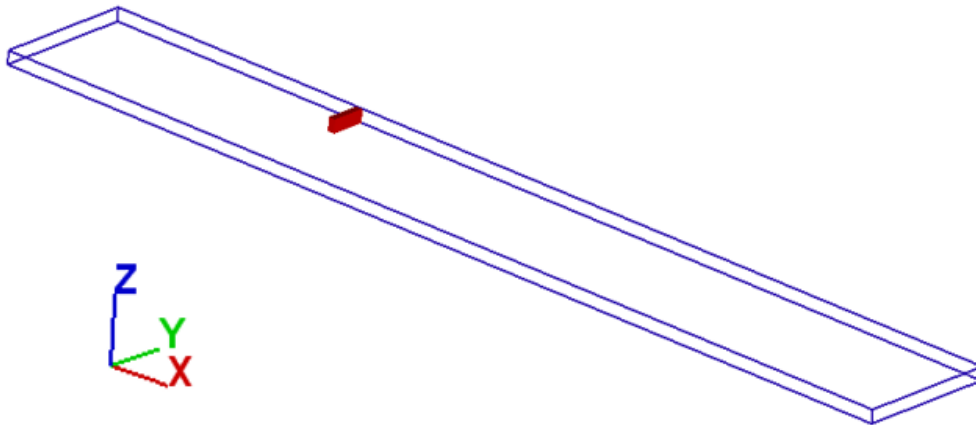
۴-۲-۱-۱- تنظیمات نرم افزار و فیزیک مدل سازی

در ابتدای مدل سازی می بایست مفروضات مدل سازی برای نرم افزار تعریف شود. که واحد شبیه سازی برحسب SI و واحد دما برحسب درجه سلسیوس است. سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته می شود و همچنین با توجه به اطلاعات نرم افزار در مورد انواع سیالات، آب در دمای ۲۷۳ درجه کلوین برای سیال مورد مدل سازی قرار گرفته انتخاب می شود. همچنین فشار هیدرو استاتیک را در جهت محور z تعریف می کنیم.

۴-۲-۱-۲-۴- مشخصات میدان حل

۴-۲-۱-۲-۴- مدل سازی

ابتدا هندسه فیزیک کانال و آبشکن با توجه به ابعاد مدل موردنظر در نرم افزار Autocad ساخته شد. برای وارد کردن مدل به نرم افزار FLOW-3D می بایست فایلی با فرمت stl از Autocad استخراج و در نرم افزار FLOW-3D وارد کنیم. در شکل (۴-۲) مدل ساخته شده در نرم افزار را مشاهده می کنید.



شکل (۴-۲) - مدل ساخته شده در نرم افزار Autocad

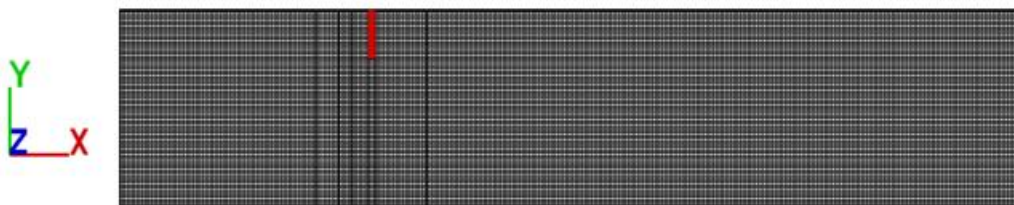
۴-۲-۱-۲-۴- شبکه بندی

برنامه FLOW-3D، فقط قابلیت تولید شبکه های حل منظم (مکعبی) را دارد. شاید در نگاه اول، این شیوه عمل به عنوان یک محدودیت برای این برنامه مطرح شود در حالی که استفاده از شبکه های مکعبی، همچنان که قابلیت تولید نتایج مطلوب را حفظ می کند، سرعت تولید شبکه های حل را نیز بسیار بالا می برد.

مش بندی یکی از مهم ترین قسمت های یک مدل سازی است از یک طرف ابعاد بزرگ برای سلول های مش ممکن است بخش جامد و سیال را به خوبی نمایش ندهند که این امر مدل سازی را ناقص و نتایج را نامناسب می کند. برای مش بندی مدل می توان از دو روش استفاده کرد، هم می توان تعداد سلول را

مشخص کرد و هم ابعاد سلول را به نرم افزار داد. برای مش بندی از ۳ روش مش های تودرتو و مش لگاریتمی و مدل مش تنها استفاده شد، مدل مش تودرتو در این مورد جواب مناسبی نداد (با توجه به دبی ورودی و خروجی و همچنین مقادیر ارتفاع آب). در نتیجه برای مدل مش به سراغ مش عادی در همه جهات رفتیم، به منظور بررسی در مقاطع فوق الذکر در جاهای مورد نظر مش پلن زده شد که این مش پلن باعث تغییر در نسبت X, Y, Z در جهات مختلف می شود. توصیه می شود این نسبت به ۱ نزدیک بوده و بیشترین مقدار آن، ۲ در نظر گرفته شود، و هر قدر این مقدار به ۱ نزدیک باشد، خطا در مدل کمتر می شود.

به منظور کاهش تعداد سلول های محاسباتی و به تبع آن کاهش زمان محاسبات، از ابتدای آب شکن تا انتهای آن مورد بررسی قرار گرفت. یکی از مهم ترین نکاتی که در شبیه سازی های عددی باید مورد توجه قرار گیرد، شبکه بندی مناسب برای حل دقیق معادلات حاکم است. ساختن شبکه مناسب، فرآیند آماده سازی اطلاعات ورودی برای مدل عددی FLOW-3D است که دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می دهد. جهت افزایش دقت و در عین حال کاهش زمان، از شبکه بندی غیریکنواخت برای شبیه سازی عددی استفاده شده است. بدین منظور در نواحی نزدیک آب شکن از سلول های بیشتر و ریزتر، و برای نواحی دیگر، از مش های درشت تر استفاده گردید. ابعاد سلول های شبکه قبلاً در شکل (۳-۴) بیان گردیده است.



شکل (۳-۴) - مش بندی در مدل سازی

این شرط مربوط به سمت جانبی کانال است که از شرط مرزی wall نرم افزار استفاده می کنیم، دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می کند. وجهی از شبکه ی حل که شرط مرزی wall به آن اختصاص داده می شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد.

شرط مینیمم Z:

این شرط مربوط به کف کانال است که از شرط مرزی wall نرم افزار استفاده می کنیم، دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می کند. وجهی از شبکه ی حل که شرط مرزی wall به آن اختصاص داده می شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد.

شرط ماکزیمم Z:

در این مرز از شرط مرزی متقارن استفاده گردید. کاربرد دیگر این نوع شرط مرزی در سطح آزاد سیال است. وقتی شرط مرزی روی مرز z, \max symmetry در نظر گرفته شود، تا وقتی که جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بی نهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می شود.

۴-۲-۱-۲-۴- بررسی نتایج حاصل از مدل سازی

مدل سازی برای مدت ۳۰۰ ثانیه در نرم افزار انجام گرفت، بعد از تنظیمات مناسب برای ایجاد مدل فیزیکی در نرم افزار، در بخش اول تکنیک مورد نظر پیداشده و بعد از آن آنالیز مش و آنالیز مدل های آشفستگی متفاوت انجام شد، از آنجاکه در مقاله مربوط به صحت سنجی مدل سازی جریان در اطراف آب شکن (مقاله زولین) از یک مدل آشفستگی شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده بود پس می توان گفت که این مدل آشفستگی برای ابتدای کار مناسب است. مدل مش تودرتو در این مورد جواب مناسبی نداد (با توجه به دبی ورودی و خروجی و همچنین مقادیر ارتفاع آب)، البته مش بندی در

^۱ symmetry

^۲ Large Eddy Simulation(LED)

حالت تودرتو در مورد محاسبات سرعت نتایج مناسبی داده اما سطح آب در این حالت با خطای مناسبی مدل سازی نشد.

در حالت دوم به بررسی طول کانال در شبیه سازی جریان اطراف آب شکن پرداخته شد، ابتدا طول کانال ۱۳/۸ متر در نظر گرفته شده و سپس طول کانال کمتر شده و ۹ متر در نظر گرفته شد در این حالت ها خطای ناشی از اندازه گیری سرعت در هر دو حالت به خوبی حاصل شده، و سپس به بررسی سطح آب پرداخته شد، نتایج حاصله نشان داد که هر چه طول کانال افزایش یابد خطای ناشی از شبیه سازی سطوح آب در کانال کمتر خواهد شد و لذا طول نهایی کانال برای صحت سنجی جریان همان طول ۱۳/۸ متر در نظر گرفته شد. مشاهده گردید، سرعت در هر دو حالت (کانال با طول های ۱۳/۸ و ۹ متر) به خوبی مدل می شود، در این حالت به بررسی سطوح آب پرداخته می شود. همان طوری که در جدول ۲-۴ مشاهده می شود طول کمتر نسبت به طول بیشتر سطح آب را با کیفیت کمتری نشان می دهد. پس در نتیجه از مدل با طول بیشتر استفاده می کنیم. مقدار خطای محاسباتی با رابطه زیر به دست می آید :

$$\text{Error} = \text{Abs} (H_{\text{computed}} - H_{\text{average measured}})$$

برای بررسی میزان خطا از رابطه ی (۱-۴) استفاده می شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - N_i| \quad (1-4)$$

که در آن ها E_i نتایج آزمایشگاهی و N_i نتایج مدل عددی و n تعداد داده ها می باشد

جدول (۴-۲) - خطای ناشی از مقادیر محاسباتی سرعت و سطوح آب

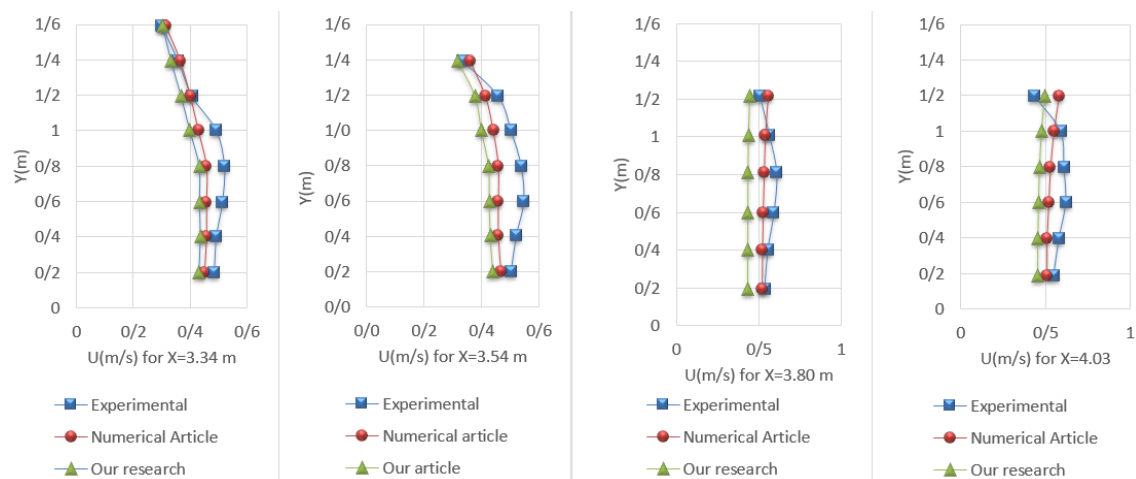
سرعت جریان	ME	MAE	R2
حالت اول (طول کانال=۱۳/۸ متر)	0.975	0.035	0.983
حالت دوم (طول کانال=۹ متر)	0.96	0.036	0.974
سطوح آب	ME	MAE	R2
حالت اول (طول کانال=۱۳/۸ متر)	-6.333	0.671	0.788
حالت دوم (طول کانال=۹ متر)	-65.916	2.088	0.709

در حالت بعدی به سراغ بررسی مدل آشفتگی و آنالیز مش می‌رویم. مش با ابعاد ۳ سانتیمتری و ۲ سانتیمتری در حالت‌های مختلف آشفتگی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج به شرح جدول (۴-۳) است

جدول (۴-۳) - بررسی حالت‌های مختلف آشفتگی

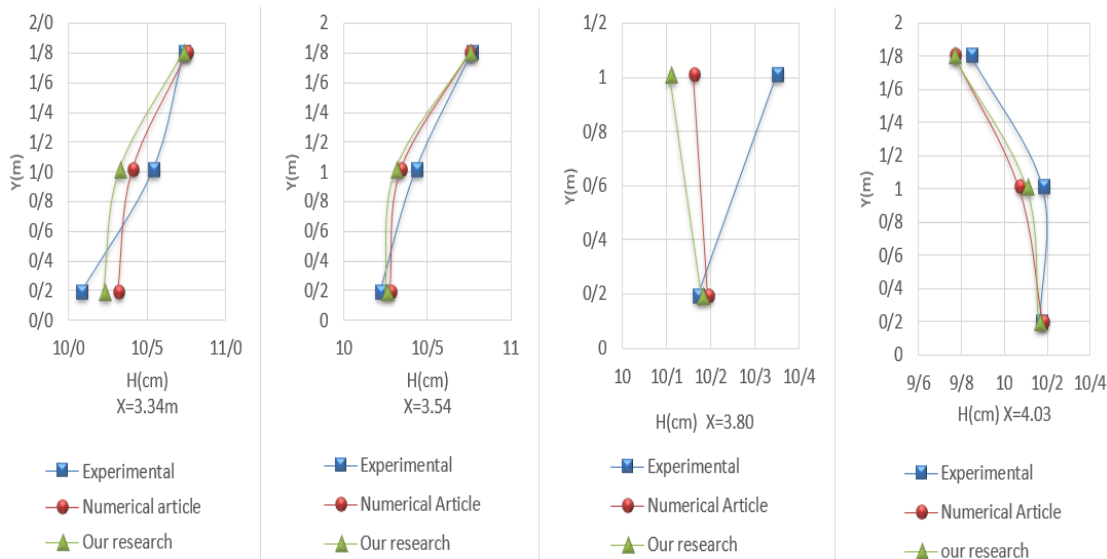
سطح آب		سرعت		سایز سلول‌ها	نوع مدل آشفتگی
MAE	R2	MAE	R2		
0.201	0.809	0.064	0.983	0.03	LES
0.394	0.756	0.076	0.981	0.02	LES
0.848	0.828	0.081	0.982	0.03	K-w
1.139	0.719	0.083	0.980	0.02	K-w
0.745	0.805	0.080	0.982	0.03	RNG
0.301	0.829	0.072	0.978	0.02	RNG
0.631	0.799	0.078	0.982	0.03	K-e
0.162	0.775	0.077	0.980	0.02	K-e

مش دو سانتیمتری در بسیاری از موارد پایدار نشد، در نتیجه مش بندی تغییر یافته و بامش بندی سه سانتیمتری شبکه بندی انجام شد، همزمان محاسبات کاهش یافته و نیز خطای محاسباتی نیز کمتر شد. مدل k-e در حالت ۲ سانتیمتری جواب نسبتاً خوبی داشته لیکن نکته اول اینکه مثل مش ۳ سانتیمتری پایداری نداشت. انتظار آن است که در حالت کلی دقت جواب ها با ریزتر شدن شبکه ی جل بیشتر شود، لکن زمانی که سلول های شبکه از حد خاصی ریزتر شوند نرم افزار در شناسایی جسم صلب دچار مشکل شده و از طرفی گام زمانی حل با گام مکانی تطابق نمی یابد، لذا همیشه نمی توان گفت ریزتر شدن شبکه بندی میدان حل نتایج بهتری را ایجاد می کند. نکته دوم اینکه که در مدل LES سرعتها با دقت بسیار بهتری مدل شدند.



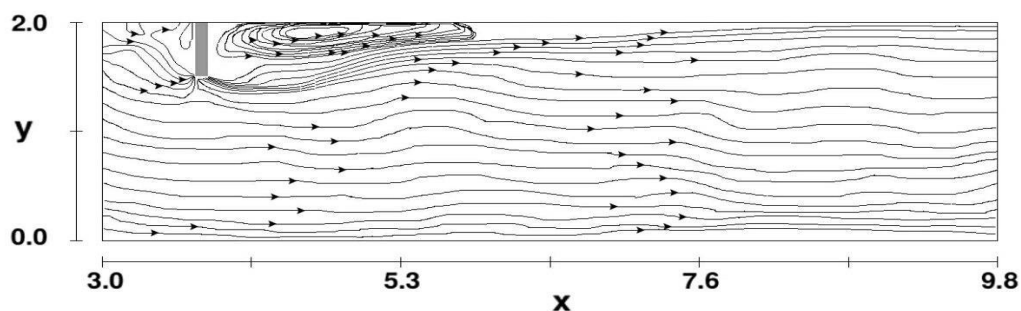
شکل (۴-۴) - مقایسه مؤلفه های سرعت در جهت طولی بر حسب نتایج آزمایشگاهی ژین و تانگ و نتایج عددی موجود صحت سنجی کار با نرم افزار با مدل سازی جریان اطراف آبشکن و حصول منحنی های سرعت و سطوح آب همانند مقاله ژین و تانگ به اتمام رسیده و نتایج خوبی به دست آمدند.

در شکل های (۴-۴) و (۵-۴) منحنی های آبی، قرمز و سبزرنگ به ترتیب نتایج حاصل از مدل سازی آزمایشگاهی، عددی در مقاله و نتایج این پژوهش می باشند.



شکل (۴-۵) - سطوح آب در اطراف آبشکن در نقاط متفاوت روی محور طولی

شکل (۴-۶) خطوط جریان و گردابه ی شکل گرفته در اطراف آبشکن را نشان می دهد.



شکل (۴-۶) - خطوط جریان و گردابه ی شکل گرفته در اطراف آبشکن

۴-۲-۲- مدل سازی جریان اطراف آبشکن با در نظرگیری ورود آلودگی

در این بخش در ابتدا به بررسی نحوه شبیه سازی در نرم افزار پرداخته شده و سپس نتایج تحلیلی و نمودارهای مربوط به نتایج استخراج شده است.

۴-۲-۲-۱- مشخصات مدل مورد نظر برای شبیه سازی منبع آلودگی در جریان

برای مدل سازی در ابتدا بایستی نوع سیال، سیستم واحدهای مورد استفاده و شرایط فیزیکی حاکم بر مسئله تعریف گردد که به دلیل عمومیت داشتن موضوع، از توضیح بیشتر در این خصوص خودداری گردیده است.

برای حل آشفتگی جریان معادلات جریان دچار تغییراتی می شوند که این به دلیل ظاهر شدن تنش های رینولدز در اثر آشفتگی جریان است. از مهم ترین معادلات حاکم بر جریان می توان به معادلات پیوستگی و ناویرا-ستوکس برای سیالات نیوتنی اشاره کرد. حل آشفتگی جریان با مدل های آشفتگی امکان پذیر است. مدل های آشفتگی بسیاری وجود دارند که اغلب آن ها بر پایه فرضیه بوزینسک، تنش های رینولدز را حل می کنند. مهم ترین مدل های آشفتگی شامل مدل های تک معادله ای، دو معادله ای و شبیه سازی گردابه های بزرگ می باشند. برای مدل سازی جریان در بسیاری از مدل سازی های اولیه اغلب از مدل های دو معادله ای $K-\epsilon$ و RNG استفاده می شود ولی در این تحقیق به دلیل به وجود آمدن گردابه از مدل عددی LES استفاده شده است.

۴-۲-۲-۲-۲- مشخصات میدان حل

این بخش از برنامه به معرفی هندسه محیط شبیه سازی و ایجاد شبکه حل اختصاص دارد. مواردی از قبیل جنس دیوارها، میزان چگالی، غلظت ورودی آلودگی، ابعاد دیوارها، نوع حرکت سیال و خواص فیزیکی و دینامیکی سیال از قبیل ارتفاع آب، میزان دبی و شدت جریان، شبکه حل و نوع مرزبندی در این قسمت از نرم افزار وارد می گردد.

در ابتدا به متغیرهای موجود در مدل سازی اشاره می شود. متغیرها در این قسمت شامل ۲ بخش کلی می باشند که بخش اول مربوط به ابعاد آبشکن و بخش دیگر نقطه محل ورود آلودگی است. در مجموع با توجه به متغیرها از ۴۰ مدل استفاده شده است. ابعاد آبشکن ها به صورت $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ ، $0/4$ ، $0/5$ ، $0/6$ و $0/7$ متر در نظر گرفته شده است. در تمامی حالت های ورود آلودگی، آبشکن در فاصله $3/8$ متری از ابتدای کانال واقع شده است. با توجه به محل ورود آلودگی متغیرها به فرم زیر علامت گذاری شده اند:

Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آبشکن

Case B: ورود آلودگی از جداره کانال سمت آبشکن، قبل از آبشکن

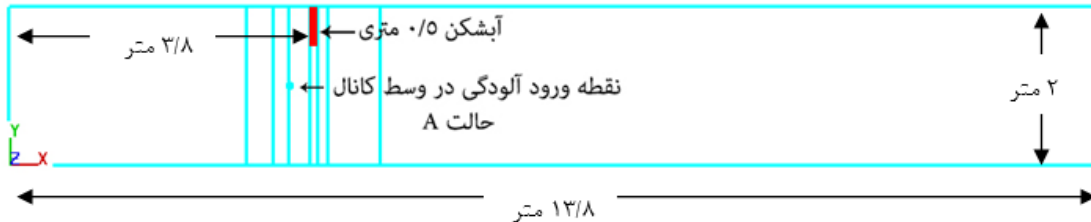
Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آبشکن

Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه (تعیین مرکز گردابه با توجه به نمودارهای سرعت جریان است)

Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال (حد فاصل دماغه آبشکن و جداره مقابل آن)

Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آبشکن و از کناره کانال سمت آبشکن

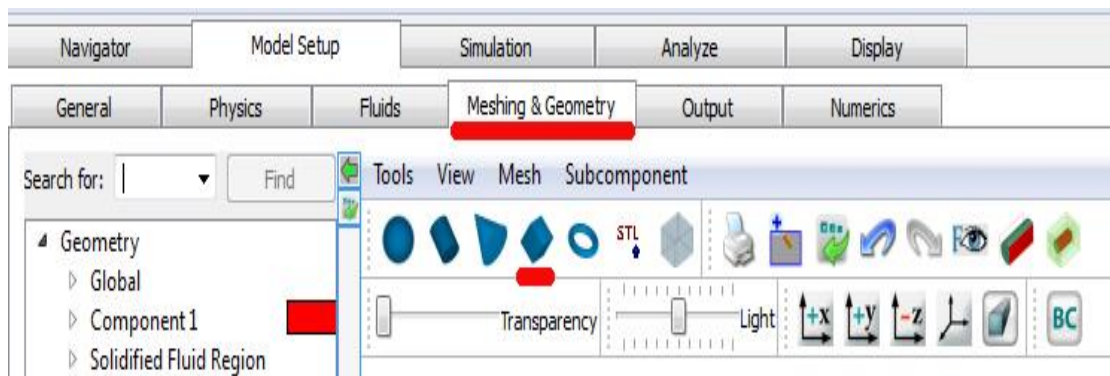
به‌عنوان نمونه در شکل (۷-۴) هندسه مدل در Case A مشخص شده است.



شکل (۷-۴) - هندسه مدل سازی در Case A

جهت مدل سازی هندسه مسئله از امکانات گزینه Meshing & Geometry در داخل خود نرم افزار

Flow-3D استفاده شده است. شکل (۸-۴)



شکل (۸-۴) - منوی اصلی مدل سازی در نرم افزار Flow-3D

در جدول (۴-۴) حالت‌های مختلف مدل سازی آورده شده است.

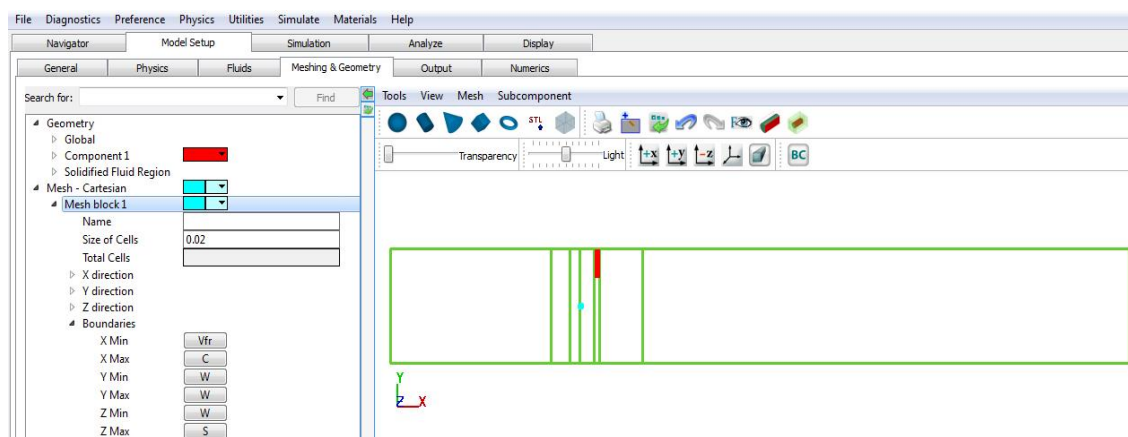
جدول (۴-۴) - حالت‌های مختلف مدل سازی منبع ورود آلودگی به جریان

نسبت طول آبشکن به عرض کانال	ابعاد آبشکن (متر)	محل ورود آلودگی	ردیف
۰	بدون آبشکن	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آبشکن	۱
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آبشکن، قبل از آبشکن	۲
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آبشکن	۳

		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۴
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۵
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۶
۰/۰۵	۰/۱	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۷
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۸
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۹
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۱۰
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۱۱
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۱۲
۰/۱	۰/۲	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۱۳
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۱۴
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۱۵
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۱۶
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۱۷
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۱۸
۰/۱۵	۰/۳	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۱۹
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۲۰
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۲۱
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۲۲
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۲۳
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۲۴
۰/۲	۰/۴	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۲۵
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۲۶
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۲۷
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه‌ها	۲۸
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۲۹
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۳۰
۰/۲۵	۰/۵	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۳۱
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۳۲
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۳۳
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۳۴
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۳۵
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۳۶
۰/۳	۰/۶	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۳۷
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۳۸
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۳۹
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۴۰
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۴۱
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۴۲
۰/۳۵	۰/۷	Case A: ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل آب‌شکن	۴۳
		Case B: ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن	۴۴
		Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آب‌شکن	۴۵
		Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه	۴۶
		Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال	۴۷
		Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آب‌شکن و از کناره کانال	۴۸

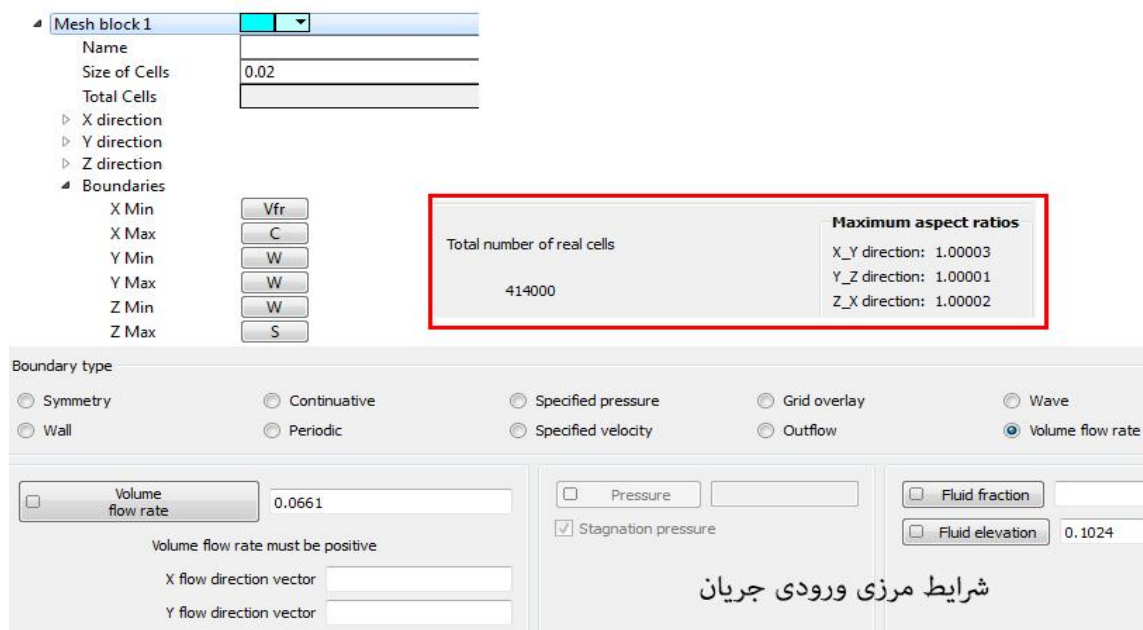
۳-۲-۲-۴- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

پس از وارد کردن هندسه مدل نوبت به شبکه‌بندی و اعمال مرزبندی صحیح جهت انجام مدل‌سازی است. در شکل (۹-۴) نوع شبکه‌بندی به‌کاررفته شده جهت مدل‌سازی آورده شده است.



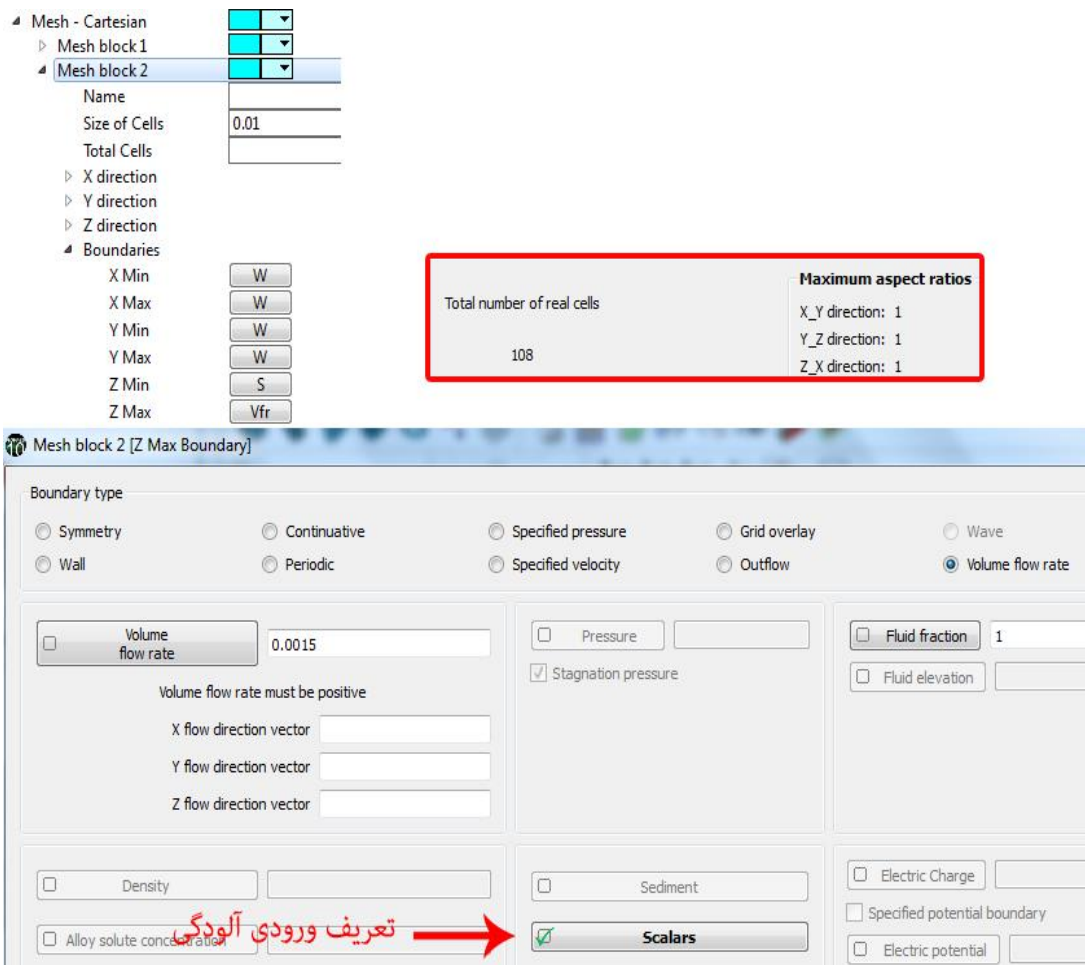
شکل (۹-۴) - شبکه‌بندی و مرزبندی جریان

با توجه به هندسه حل شبیه‌سازی از ۲ شبکه متفاوت برای حل عددی جریان استفاده شده است. شبکه شماره ۱ شامل ورود جریان با دبی مشخص 0.0661 مترمکعب بر ثانیه است که از شبکه با سلول‌های ۲ سانتیمتری به تعداد ۴۱۴۰۰۰ هزار سلول در آن استفاده شده که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. شرایط مرزبندی در شبکه شماره ۱ به حالت ورودی جریان با دبی مشخص، جریان ادامه‌دار، دیوار، دیوار، دیوار و مرز متقارن است.



شکل (۴-۱۰) - شرایط مرزی شبکه بندی شماره ۱

شبکه شماره ۲ شامل ورود جریان آلودگی با دبی مشخص ۰/۰۰۱۵ مترمکعب بر ثانیه و با غلظت ۱ کیلوگرم بر مترمکعب است که از شبکه با سلولهای ۲ سانتیمتری به تعداد ۱۰۸ سلول در آن استفاده شده که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. شرایط مرز بندی در شبکه شماره ۲ به حالت دیوار، دیوار، دیوار، تقارن و ورود جریان آلودگی با دبی مشخص است. جهت تعریف ورود آلودگی به جریان از گزینه Scalars استفاده شده است که با فعال کردن این گزینه می توان مقدار غلظت آلودگی را به مدل معرفی نمود.



شکل (۴-۱۱) - شرایط مرزی شبکه بندی شماره ۲

در ادامه به توضیح مرزهای انتخاب شده پرداخته شده است.

- شرط مرزی دبی (جریان)

در مدل سازی صورت گرفته مرز ($X_{min}-Z_{max}$) شدت جریان ورودی است که به نرم افزار بر حسب مترمکعب بر ثانیه معرفی شده است.

- شرط مرزی Symmetry

این نوع شرط مرزی، شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می گیرد. مثلاً در شبیه سازی جریان بر روی یک سرریز اوجی عریض، می توان عرض کوچکی از سرریز را در نظر گرفت و شرط مرزی طرفین را Symmetry معرفی کرد. کاربرد دیگر این نوع شرط مرزی در

سطح آزاد سیال است. در نرم‌افزار فلو تری دی حجم سیال $VOF(x, y, z, t)$ که جهت مدل‌سازی سطح آزاد سیال به کار می‌رود به صورت زیر تعریف می‌شود.

(۳-۴)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial x} (F u A_x) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} (F v A_y) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} (F w A_z) \right) \right\} + \xi \frac{(F u A_x)}{x} = F_{SOR} + F_{DIF}$$

(۴-۴)

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right\}$$

F به عنوان جز حجم سیال، $v_F = \frac{c_F \mu}{\rho}$ و F_{SOR} منبع جرم است.

در صورتی که $F=0$ باشد، سلول پر از هوا و در صورتی که $F=1$ باشد، سلول پر از آب است. سطح آزاد جایی تعیین می‌شود که در آن $0 < F < 1$ است و در واقع این سطح مرزی بین وجود سیال و هوا است. از دیگر کاربردهای این شرط مرزی که در مسائل شامل بیش از یک شبکه مکعبی به عنوان میدان حل کاربرد دارد، استفاده از آن در روی وجه‌های به هم چسبیده دو شبکه حل مجزا است تا از این طریق، مشخصات جریان در مرز شبکه اول بدون تغییر به شبکه دوم اختصاص داده شود.

- شرط مرزی Wall

این شرط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می‌کند. وجهی از شبکه حل که شرط مرزی Wall به آن اختصاص داده شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد.

- شرط مرزی Continuative

این شرط مرزی بیشتر با هدف عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه حل از شرایط مرز خروجی ایجاد شده است. جریانی که به این مرز می‌رسد، شرایط مرز خود را طوری تطبیق می‌دهد که جریان بدون تأثیری از مرز عبور کند. (مثلاً موج رسیده به مرز بدون هیچ انعکاسی از مرز عبور کند).

تناسب شبکه‌بندی در این نرم‌افزار یکی از پارامترهای بسیار مهم بوده که باید رعایت گردد. برای رعایت این موضوع نرم‌افزار FLOW 3D این امکان را به کاربر می‌دهد که صحت تناسب تعداد شبکه‌ها را در سه

راستای (X و Y و Z)، به وسیله دو پارامتر *maximum adjacent cell size info* و *maximum Aspect Ratio* در راستاهای بیان شده تعیین نماید. پارامتر *maximum adjacent cell size info* بیشترین نسبت اندازه سلول‌های مجاور را در سه راستای (X و Y و Z) به دست می‌دهد، که برای دستیابی به دقت بالا در حل مسئله و کاهش خطای ناشی از شبکه‌بندی، مقدار این پارامتر در هر سه راستا کمتر از ۱/۲۵ باشد. پارامتر *maximum Aspect Ratio* بیشینه نسبت صفحات را نسبت به یکدیگر برآورد می‌کند. مقدار این پارامتر برای هر سه صفحه X-Z، Y-Z و X-Y نباید بیشتر از ۳ باشد. انتخاب تعداد شبکه بهینه در این نرم‌افزار امری ضروری است. جهت بررسی دقت نوع شبکه‌بندی هر مدل‌سازی چندین بار با ابعاد سلول مختلف انجام شد تا در نهایت به روش سعی و خطا و تکرار یک حالت بهینه برای ابعاد سلول‌ها به دست آمد.

۴-۲-۲-۴- بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی

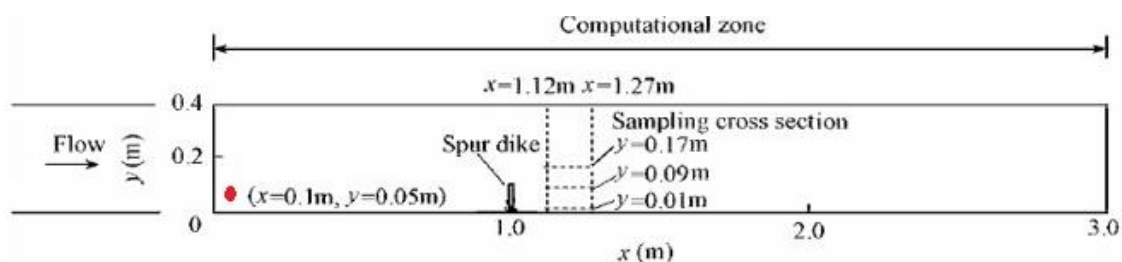
برای صحت‌سنجی نرم‌افزار در بحث مدل‌سازی آلودگی، از مقاله پینگ و ژیانگ (۲۰۱۰) استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها در این حالت بر روی آب‌شکن از نوع غیر مستغرق انجام گرفت. شرایط شبیه‌سازی کاملاً مشابه مقاله مورداستفاده در نظر گرفته شد. شرایط کلی مدل‌سازی در این مورد در جدول (۴-۵) نشان داده شده است.

جدول (۴-۵) - مشخصات کلی مدل‌سازی با در نظرگیری منبع ورود آلودگی (حالت صحت‌سنجی آلودگی)

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
دبی ورودی آب	Q_{in}	m^3/s	۰,۰۰۳۶
عمق متوسط جریان	h_{in}	m	۰,۰۸۷
طول کانال در راستای X	L_x	m	۱۴
عرض کانال در راستای Y	L_y	m	۰/۴
ارتفاع کانال در راستای Z	L_z	m	۰,۴

فاصله آبشکن از ابتدای کانال	L	m	۷
ضخامت آبشکن در راستای X	d_1	m	۰,۰۱۵
طول آبشکن در راستای y	d_2	m	۰,۱
ارتفاع آبشکن در راستای Z	d_3	m	۰,۱

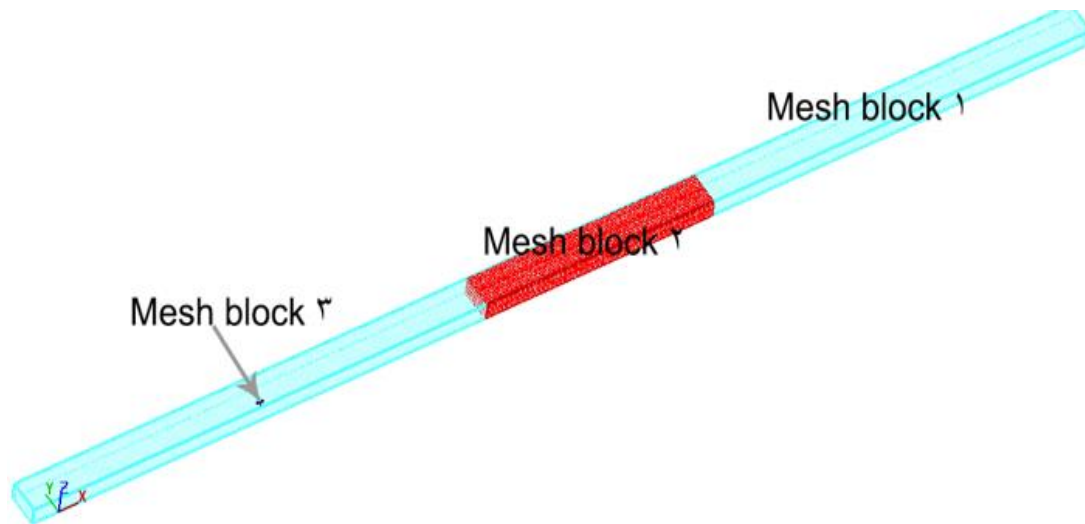
ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده، اطراف آبشکن به طول ۳ متر و عرض ۰/۴ متر و ارتفاع ۰/۲ متر در نظر گرفته شد. محل تخلیه آلاینده به فاصله ۰/۱ متر از شروع ناحیه محاسباتی، و عرض ۰/۰۵ متر و بر روی سطح آب مشخص گردید. در شکل (۴-۱۲) مختصات نقطه ی ورود آلودگی با مختصات مربوطه به وضوح نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۲) - ناحیه محاسباتی اطراف آبشکن

برای در نظرگیری ناحیه محاسباتی و محل ورود آلودگی در نرم افزار از ۳ مش بلاک و ۳۴۱۴۲۰ هزار سلول استفاده شده که در شکل (۴-۱۳) قابل مشاهده است.

$$\text{خطا} = (Q_{num} - Q_{exp})/Q_{exp}$$



شکل (۴-۱۳)- مش بندی ناحیه محاسباتی و محل ورود آلودگی

مش بلاک ۲ همان ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده است که در نرم افزار با رنگ قرمز مشخص شده است. جهت جریان از سمت مش بلاک ۳ به سمت مش بلاک ۲ است.

جهت پایداری سیستم زمان ۳۰۰ ثانیه صرف گردید و سپس جریان آلودگی به سیستم تزریق گردید.

با توجه به نتایج حاصله می بینیم که میزان خطای بین نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بین ۴ تا ۲۱ درصد است که این میزان نشان دهنده ی تطابق مناسب نتایج و مؤید صحت مدل سازی عددی است. میزان خطای مدل سازی را با روش زیر محاسبه می کنیم:

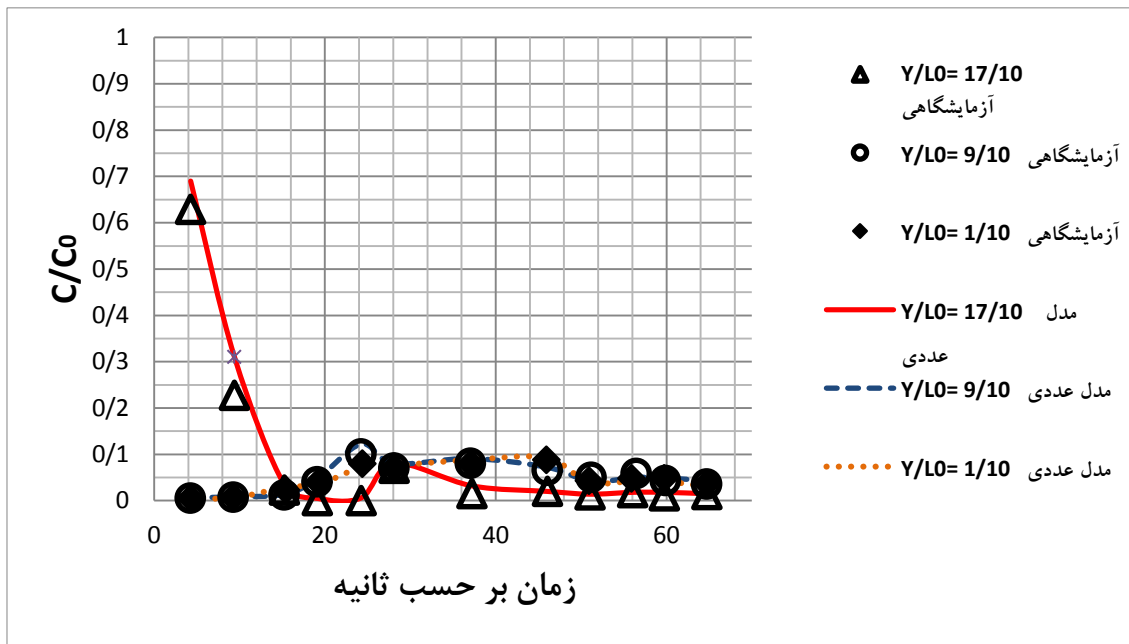
$$(۴-۵)$$

که در آن Q_{num} نشان دهنده ی دبی در مدل عددی، Q_{exp} دبی آزمایشگاهی است.

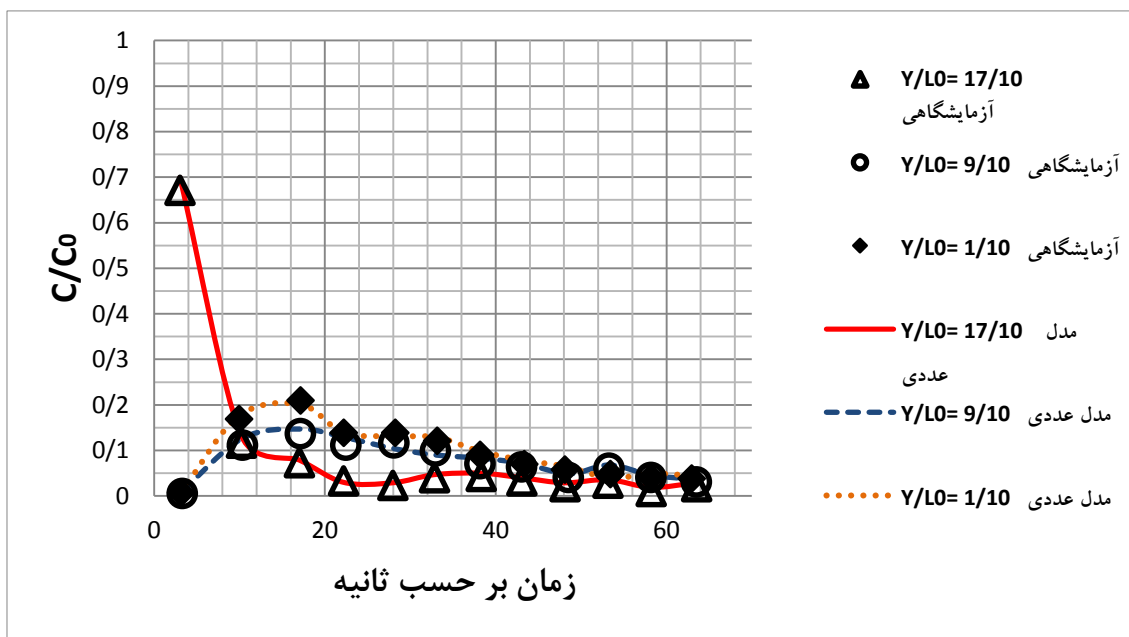
جدول (۴-۶) - مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی

نوع مدل	زمان (s)	غلظت آلودگی (gr/lit)	خطا (%)
مدل آزمایشگاهی	۳,۰۲۵	۰,۶۷۱	۴
مدل عددی	۳,۰۲۵	۰,۶۹۹	
مدل آزمایشگاهی	۲۷/۹۴۳	۰/۰۲۳	۲۱
مدل عددی	۲۷/۹۴۳	۰/۰۲۹	

نتایج مدل عددی در نمودار شکل (۴-۱۴) و شکل (۴-۱۵) نشان دهنده‌ی انطباق مناسب آن با نتایج مدل آزمایشگاهی است. L_0 نشان دهنده‌ی طول آبشکن و X_0 نشان دهنده‌ی نقطه رهاسازی آلودگی تا آبشکن است.



شکل (۴-۱۴) - غلظت آلودگی به عنوان تابعی از زمان در مقطع عرضی $X_0/L_0=12/10$



شکل (۴-۱۵) - غلظت آلودگی به عنوان تابعی از زمان در مقطع عرضی $X_0/L_0=27/10$

فصل پنجم: نتایج و بحث

۵-۱- مقدمه

سواحل دریاچه‌ها و رودخانه‌ها برای چندین دهه مکان‌هایی مناسب برای تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی بوده‌اند. در سالهای اخیر تعدد شرکت‌های صنعتی و تولیدی باعث افزایش سطح خطرات زیست‌محیطی آلودگی آب‌شده‌اند. امروزه مدل‌های ریاضی، زبان‌های برنامه‌نویسی سطح بالا و نیز نرم‌افزارهای قدرتمند یک ابزار کارآمد در بررسی مسائل زیست‌محیطی و تحلیل رفتار جریان سیال در سیستم‌های پیچیده در اختیار محققین و مهندسين می‌باشند، به‌طور کلی تمامی این مدل‌ها، پارامترهای مختلف را با هزینه کمتر نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین صرفه‌جویی در زمان در شرایط مختلف، شبیه‌سازی می‌نمایند.

غلظت آلودگی‌های متفاوت پس از ورود به منابع سطحی آب بر اثر فرآیند انتقال-انتشار کاهش می‌یابد. در نتیجه پس از طی مسافتی این غلظت آن قدر کاهش می‌یابد که به حد مطلوب (مجاز) رسیده و امکان استفاده مجدد از آب را فراهم می‌کند.

از جمله سازه‌هایی که از آن‌ها به‌منظور تثبیت سواحل رودخانه‌ها جهت حفظ پایداری سواحل استفاده می‌شود آب‌شکن‌ها هستند. این سازه‌ها معمولاً در کناره رودخانه احداث شده و در ارتباط مستقیم با اکولوژی رودخانه هستند. از این رو طراحی و محل نصب آن‌ها نیز از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

۵-۲- هدف پایان‌نامه:

به‌منظور ایجاد اختلاط طبیعی بیان شده در بخش قبل، می‌توان در مسیر کانال از آب‌شکن استفاده نمود. وجود آب‌شکن در مسیر، سبب ایجاد گردابه‌ها در طول مسیر می‌شود. گردابه‌ها همانند یک همزن طبیعی عمل کرده و پخش موارد آلاینده را بهبود می‌بخشد. این گردابه می‌تواند به‌صورت طبیعی در طول کانال موجود بوده باشد و یا اینکه به‌صورت مصنوعی آن را ایجاد نمود.

در فصل اخیر، از پایان‌نامه نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی Flow-3D جهت مدل‌سازی جریان اطراف آب‌شکن مورد بررسی قرار گرفته و صحت سنجی کار با نرم‌افزار انجام پذیرفت، در فصل حاضر به بررسی

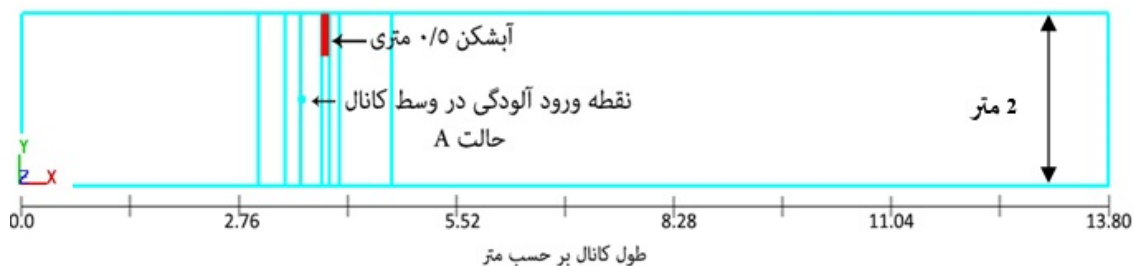
پخش آلودگی با جانمایی‌های متفاوت منبع آلوده‌ساز نقطه‌ای در اطراف آب‌شکن، و تحلیل هر یک از حالات پرداخته‌شده و درنهایت تأثیر پارامترهای هیدرولیکی نظیر تغییر دبی و نیز پارامتر عمق نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۳- نتایج توزیع آلودگی در حالات مختلف آب‌شکن با طول متفاوت:

همان‌طور که در بخش قبل ذکر گردید محل ورود آلودگی در ۶ حالت A,B,C,D,E,F است در ادامه برای بررسی تأثیر نقطه محل ورود آلودگی و تغییرات ابعاد آب‌شکن نتایج عددی مدل‌ها آورده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۵-۳-۱- Case A ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل از آب‌شکن:

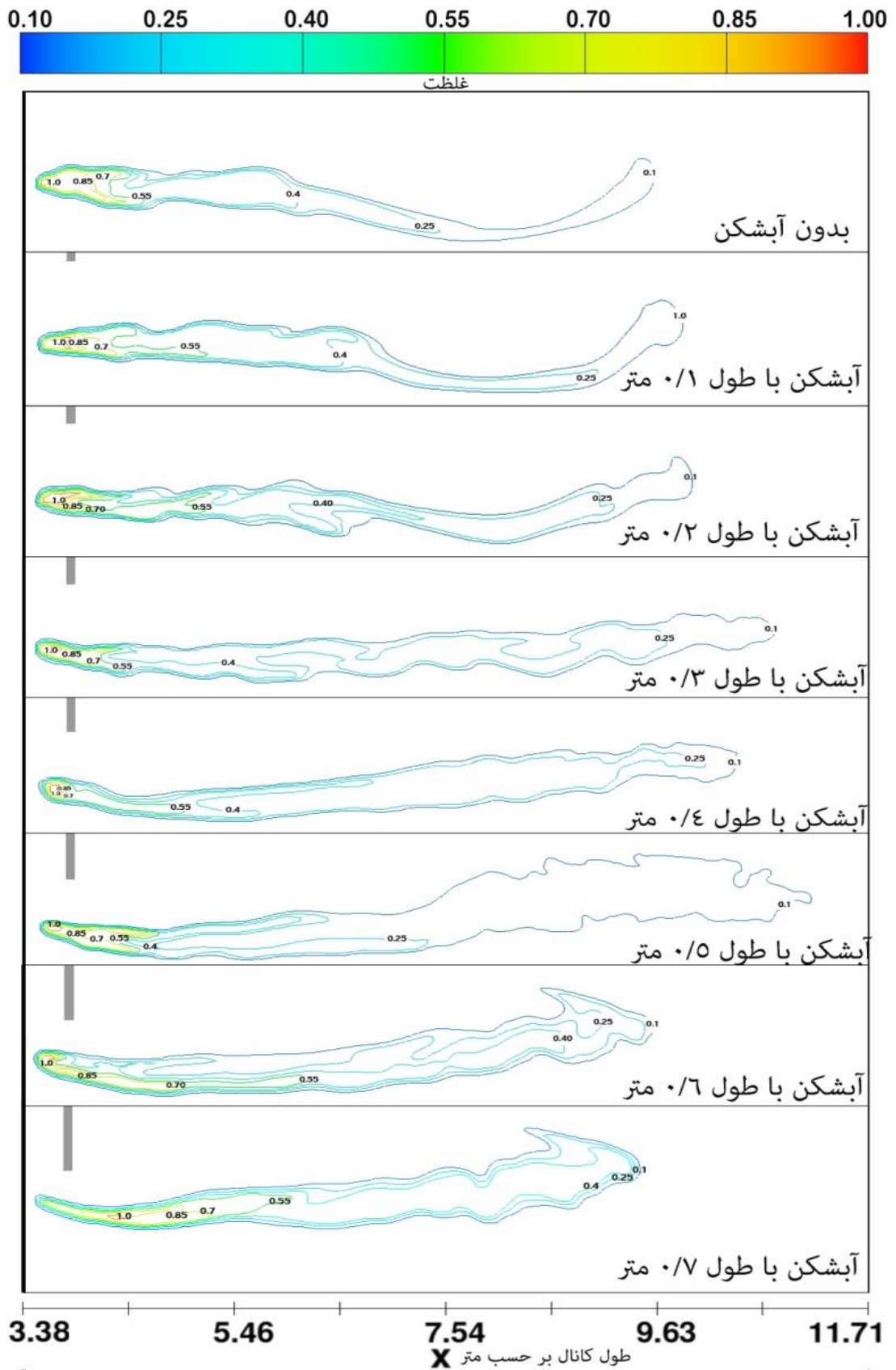
شکل (۵-۱) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case A را در حالت آب‌شکن با ابعاد ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. در شکل (۵-۲) نمودارهای توزیع آلودگی در Case A ترسیم شده است و جهت مقایسه بهتر، تمامی نتایج مدل‌های Case A در یک نمودار آورده شده‌اند.



شکل (۵-۱)- موقعیت نقطه ورود آلودگی در Case A

در شکل (۵-۲) نوار رنگی بالای نمودار بیانگر غلظت و محور افقی X طول کانال بر حسب متر است. جهت نمایش بهتر نمودارهای غلظت خروجی از فاصله ۳/۳۸ متری به بعد در نظر گرفته شده است.

در جدول (۵-۱) مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case A آورده شده است. جهت مشخص شدن طول گردابه در نتایج فاصله ۳/۳۸ تا ۱۱/۷۱ متری برای کل حالات مدل‌سازی A آورده شده است.

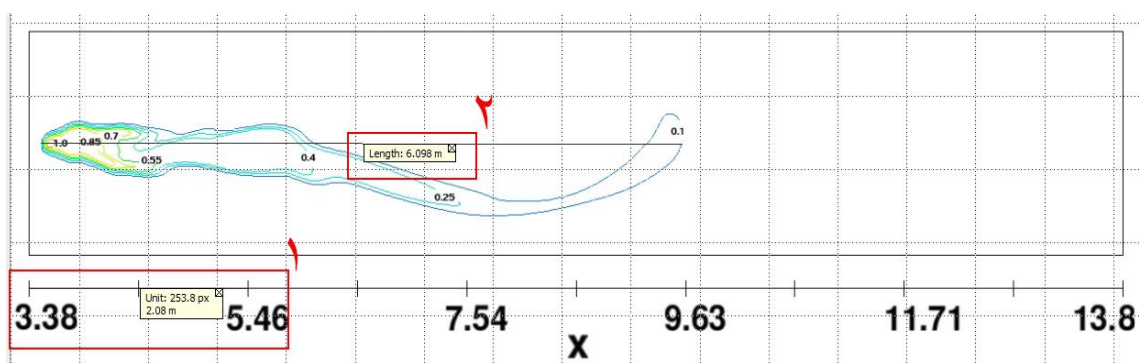


شکل (۵-۲) - توزیع آلودگی در Case A

جدول (۵-۱) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case A

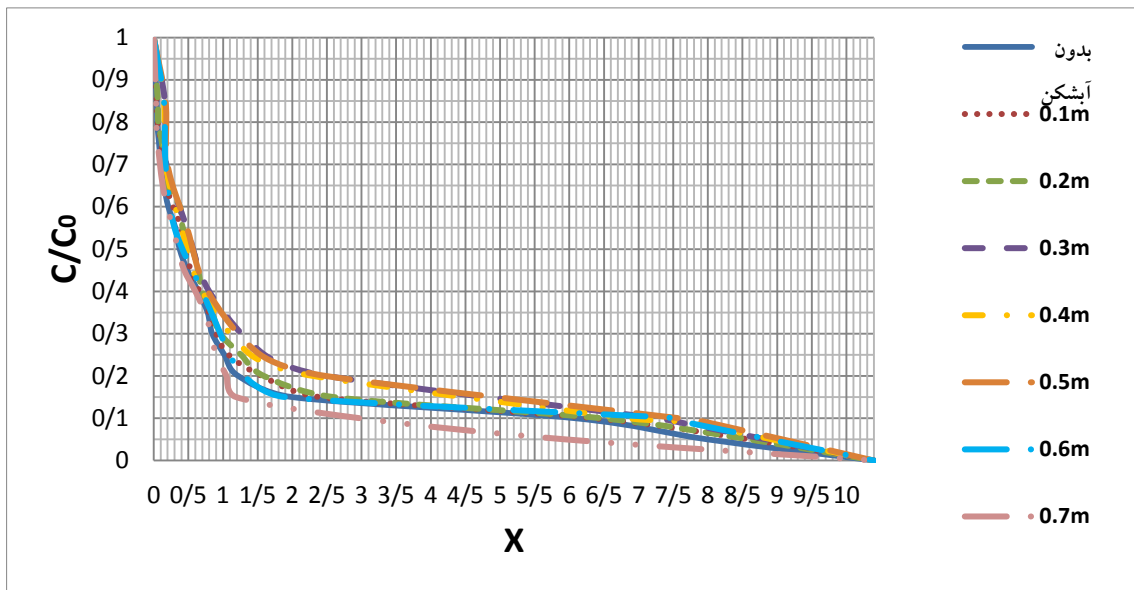
ردیف	طول آب‌شکن (m)	عرض بازشدگی (m)	عرض کانال (m)	ارتفاع آب (m)	دبی عبوری ($\frac{m^3}{s}$)	طول گردابه تشکیل شده (m)	نسبت بازشدگی (m)
1	0	2	2	0.1024	0.0661	6.087	0
2	0.1	1.9	2	0.1024	0.0661	6.360	0.95
3	0.2	1.8	2	0.1024	0.0661	6.469	0.9
4	0.3	1.7	2	0.1024	0.0661	7.280	0.85
5	0.4	1.6	2	0.1024	0.0661	6.867	0.80
6	0.5	1.5	2	0.1024	0.0661	7.588	0.75
7	0.6	1.4	2	0.1024	0.0661	6.087	0.7
8	0.7	1.3	2	0.1024	0.0661	5.956	0.65

همان‌طور که در جدول (۵-۱) قابل مشاهده است در Case A بدون آب‌شکن و استفاده از آب‌شکن با طول ۰/۷ متر بهترین عملکرد را دارند و طول گردابه ناشی از آلودگی را تا ۶/۰۸۷ متر کاهش داده‌اند. البته باید توجه داشت که این مقدار کاهش طول در حالت بدون استفاده از آب‌شکن بهتر و در عمل استفاده نکردن از آب‌شکن مقرون به صرفه تر و اقتصادی‌تر است. باید توجه داشت که جهت اندازه‌گیری طول آلودگی از نرم‌افزار Digimizer استفاده شده است. در شکل (۵-۳) اندازه‌گیری طول آلودگی نشان داده شده است.



شکل (۵-۳) - نمونه اندازه‌گیری طول آلودگی

چنانچه نمودار یک‌بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول کانال رسم نماییم، آنگاه می‌توان حالات مختلف آب‌شکن را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر ابعاد آب‌شکن بر طول آلودگی را نشان می‌دهد. قابل توجه است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع آب‌شکن) در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۵) این نمودار را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case A

از شکل (۵-۵) استنباط می‌شود که تقریباً در همه حالات (به جزء آب‌شکن با طول ۰/۷ متر)، وجود آب‌شکن تأثیر منفی داشته و باعث افزایش طول آلودگی می‌شود. در نتیجه انتخاب نقطه ورود آلودگی بسیار حائز اهمیت است به گونه‌ای که انتخاب غلط باعث کاهش کارایی آب‌شکن می‌شود.

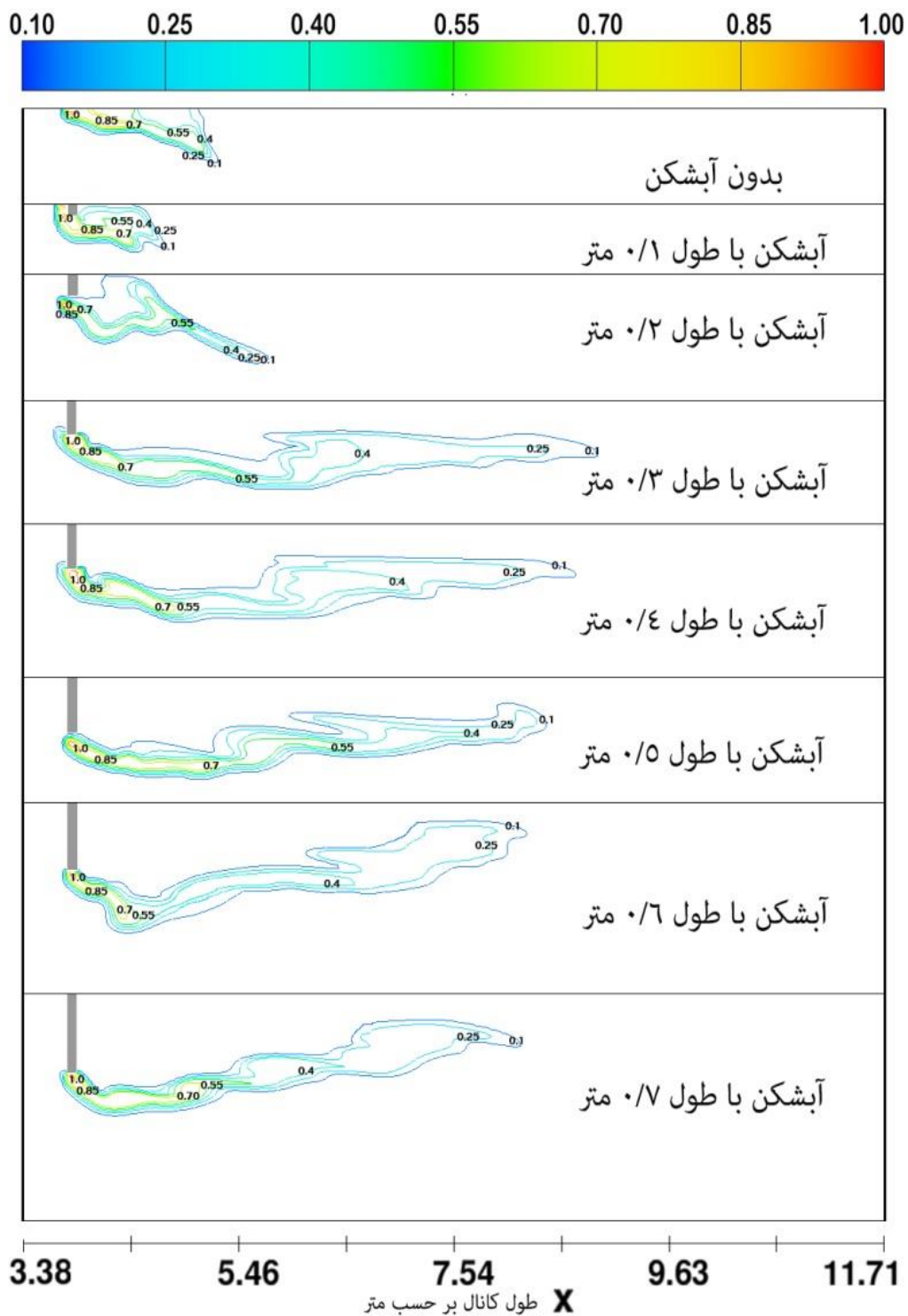
Case B: -۲-۳-۵ ورود آلودگی از کنار کانال سمت آب‌شکن، قبل از آب‌شکن

شکل (۵-۵) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case B را در حالت آب‌شکن با ابعاد ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. در ادامه نمودارهای توزیع آلودگی در Case B ترسیم شده است.



شکل (۵-۵) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case B

در شکل (۵-۶) همه نتایج مدل‌های Case B در یک نمودار جهت مقایسه آورده شده‌اند. در جدول (۵-۲)، مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه‌ها تشکیل شده از آلودگی در Case B آورده شده است. جهت مشخص شدن طول گردابه‌ها در نتایج فاصله ۳/۳۸ تا ۱۱/۷۱ متری برای کل حالات مدل‌سازی B آورده شده است.



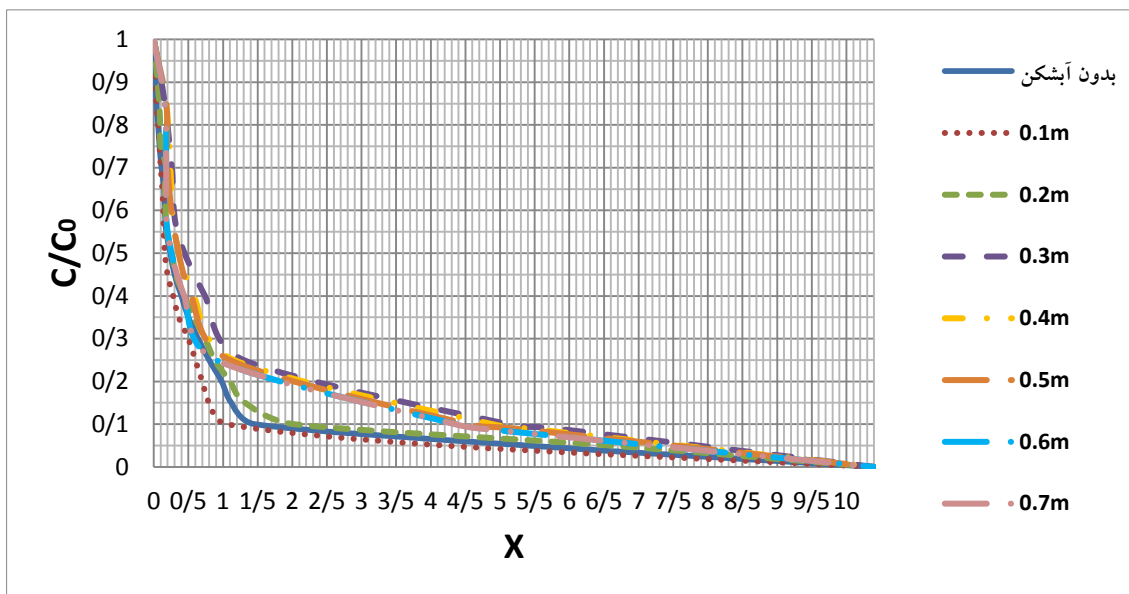
شکل (۵-۶) - توزیع آلودگی در Case B

جدول (۲-۵) - مشخصات مربوط به مدل سازی ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case B

ردیف	طول آبشکن (m)	عرض بازشدگی (m)	عرض کانال (m)	ارتفاع آب (m)	دبی عبوری ($\frac{m^3}{s}$)	طول گردابه تشکیل شده (m)	نسبت بازشدگی (m)
1	0	2	2	0.1024	0.0661	1.460	0
2	0.1	1.9	2	0.1024	0.0661	1.055	0.95
3	0.2	1.8	2	0.1024	0.0661	2.028	0.9
4	0.3	1.7	2	0.1024	0.0661	5.118	0.85
5	0.4	1.6	2	0.1024	0.0661	4.891	0.80
6	0.5	1.5	2	0.1024	0.0661	4.544	0.75
7	0.6	1.4	2	0.1024	0.0661	4.362	0.7
8	0.7	1.3	2	0.1024	0.0661	4.350	0.65

همان طور که در جدول (۲-۵) قابل مشاهده است در Case B آبشکن با طول ۰/۱ متر بهترین عملکرد را دارد و طول گردابه ها ناشی از آلودگی را از حالت بدون آبشکن با طول ۱/۴۶۰ متر به طول ۱/۰۵۵ متر کاهش داده است.

چنانچه نمودار یک بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول کانال رسم نماییم، آنگاه می توان حالات مختلف آبشکن را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر ابعاد آبشکن بر طول آلودگی را نشان می دهد. قابل توجه است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع آبشکن) در نظر گرفته شده است. شکل (۷-۵) این نمودار را نشان می دهد.



شکل (۵-۷) - تأثیر افزایش ابعاد آبشکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case B

از شکل (۵-۷) استنباط می‌شود که تقریباً در همه حالات (به جزء آبشکن با طول ۰/۱ متر)، وجود آبشکن تأثیر منفی داشته و باعث افزایش طول آلودگی می‌شود به غیر از آبشکن ۰/۱ متری این امر به این معنی است که چنانچه غلظت مجاز ۰/۱ غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از ۱/۴۶۰ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می‌رسیم، حال آنکه در کانالی با وجود آبشکن ۰/۱ متری پس از ۱/۰۵ متر به حد مجاز خواهیم رسید. نکته قابل توجه دیگر موقعیت ورود آلودگی است. در این حالت در کنار کانال و در حالت قبل در وسط عرض کانال بود که واضح است در حالت اخیر بسیار از حالت قبلی بهتر شده است.

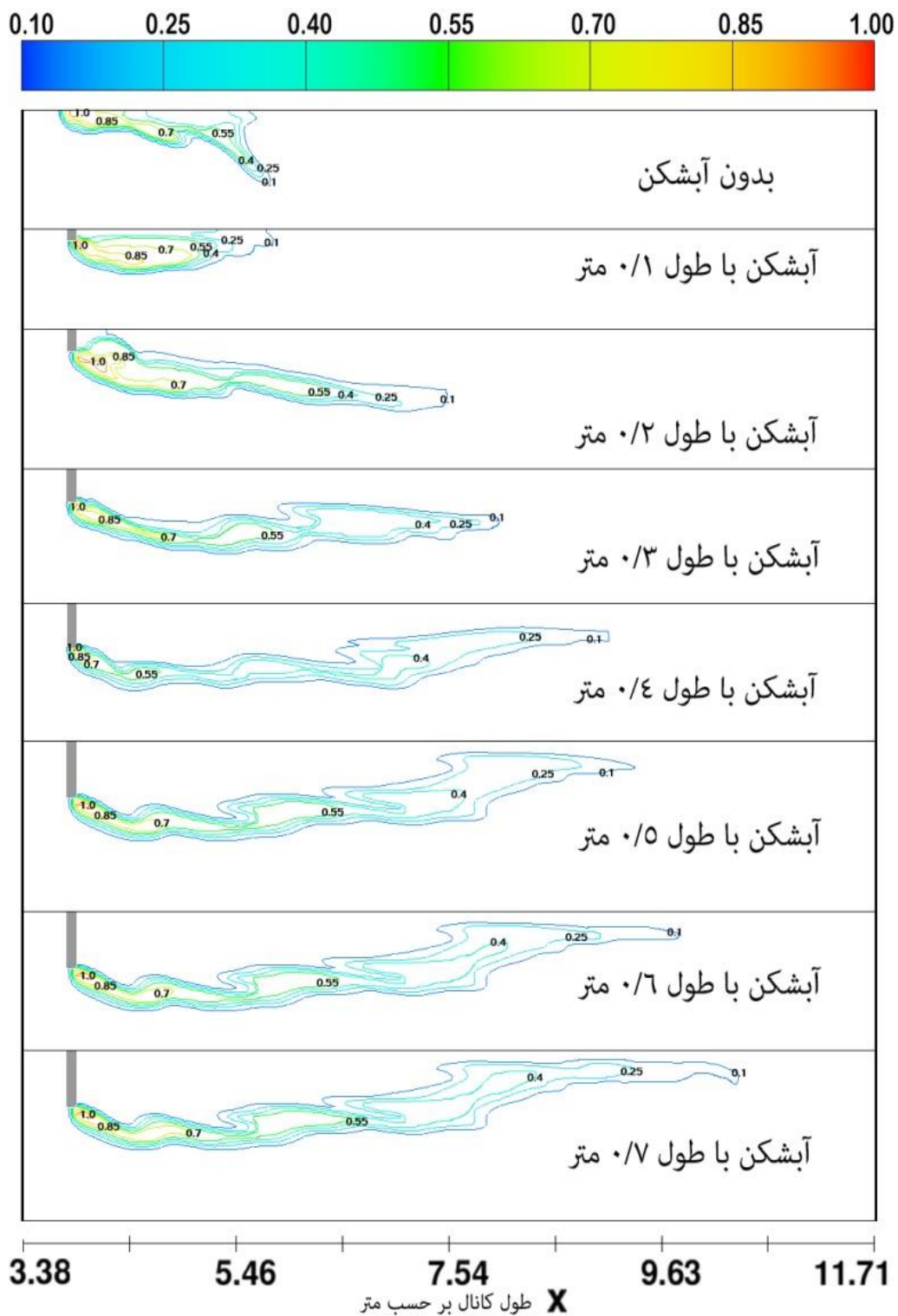
۵-۳-۳-Case C: ورود آلودگی در نقطه شروع آبشکن

شکل (۵-۸) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case C را در حالت آبشکن با ابعاد ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. در ادامه نمودارهای توزیع آلودگی در Case C ترسیم شده است.



شکل (۵-۸) - موقعیت نقطه ورود آلودگی در Case C

در شکل (۵-۹) نتایج توزیع آلودگی در Case C در یک نمودار جهت مقایسه آورده شده‌اند. در جدول (۵-۳) مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه‌ها تشکیل شده از آلودگی در Case C آورده شده است. جهت مشخص شدن طول گردابه‌ها در نتایج فاصله ۳/۳۸ تا ۱۱/۷۱ متری برای کل حالات مدل‌سازی C آورده شده است.



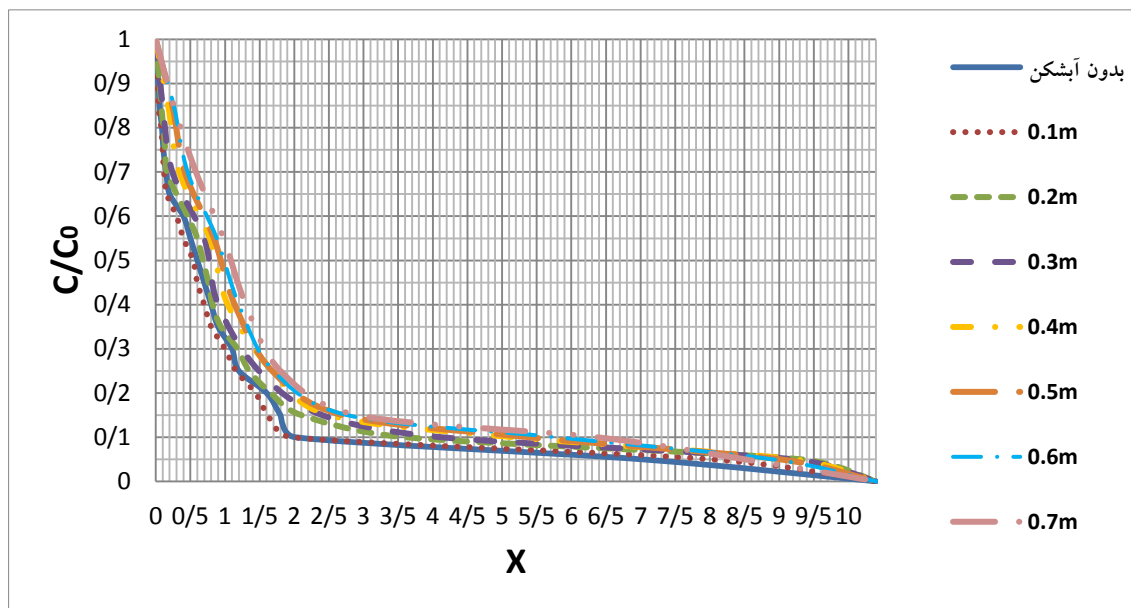
شکل (۵-۹) - توزیع آلودگی در Case C

جدول (۳-۵) - مشخصات مربوط به مدل سازی ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case C

نسبت بازشدگی (m)	طول گردابه تشکیل شده (m)	دبی عبوری ($\frac{m^3}{s}$)	ارتفاع آب (m)	عرض کانال (m)	عرض بازشدگی (m)	طول آبشکن (m)	ردیف
0	2.007	0.0661	0.1024	2	2	0	1
0.95	1.956	0.0661	0.1024	2	1.9	0.1	2
0.9	3.585	0.0661	0.1024	2	1.8	0.2	3
0.85	4.111	0.0661	0.1024	2	1.7	0.3	4
0.80	5.157	0.0661	0.1024	2	1.6	0.4	5
0.75	5.384	0.0661	0.1024	2	1.5	0.5	6
0.7	5.771	0.0661	0.1024	2	1.4	0.6	7
0.65	6.361	0.0661	0.1024	2	1.3	0.7	8

همان طور که در جدول (۳-۵) قابل مشاهده است در Case C آبشکن با طول ۰/۱ متر بهترین عملکرد را دارد و طول گردابه ناشی از آلودگی را از حالت بدون آبشکن با طول ۲/۰۰۷ متر به طول ۱/۹۵۶ متر کاهش داده است. در این حالت نیز مانند Case B آبشکن با طول ۰/۱ متر عملکرد مناسب تری داشته است.

چنانچه نمودار یک بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول کانال رسم نماییم، آنگاه می توان حالات مختلف آبشکن را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر ابعاد آبشکن بر طول آلودگی را نشان می دهد. قابل توجه است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع آبشکن) در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۱۰) این نمودار را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۰) - تأثیر افزایش ابعاد آبشکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case C

از شکل (۵-۱۰) استنباط می‌شود که تقریباً در همه حالات (به جزء آبشکن با طول ۰/۱ متر)، وجود آبشکن تأثیر منفی داشته و باعث افزایش طول آلودگی می‌شود به غیر از آبشکن ۰/۱ متری این امر به این معنی است که چنانچه غلظت مجاز ۰/۱ غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از ۲/۰۰۷ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می‌رسیم، حال آنکه در کانالی با وجود آبشکن ۰/۱ متری پس از ۱/۹۵۶ متر به حد مجاز خواهیم رسید. نکته قابل توجه دیگر موقعیت ورود آلودگی است. در نتیجه در Case C وجود آبشکن با ابعاد ۰/۱ متر بهترین عملکرد را خواهد داشت.

به طور کلی نقطه ورود آلودگی شروع بازشدگی (Case C) نسبت به آلودگی از کنار کانال سمت آبشکن، قبل از آبشکن (Case B) نتایج ضعیف‌تری را ایجاد کرده است. علت این امر این است که فاصله کافی برای آن که آلودگی به درون گردابه کشیده شود وجود نداشته است. بدیهی است که هرچقدر آلودگی بیشتر به درون گردابه فرو برود نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

۵-۳-۴ - Case D: ورود آلودگی از مرکز گردابه

شکل (۵-۱۱) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case D را در حالت آبشکن با ابعاد ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. در ادامه نمودارهای توزیع آلودگی در Case D ترسیم شده است. یادآور می‌شود که در ورود آلودگی در

مرکز گردابه، تعیین مرکز گردابه با توجه به نمودارهای سرعت جریان در هر حالت به صورت جداگانه انتخاب شده است.



شکل (۵-۱۱) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case D

اگر طول آبشکن، L متر در نظر گرفته شود، برای اینکه مشخص شود محل قرارگیری ورود آلودگی در Case D دقیقاً در کدام نقطه است، می توان مقادیر جدول (۵-۴) را مورد توجه قرارداد. در این جدول متغیر X فاصله طولی نقطه قرارگیری منبع آلودگی تا پای آبشکن و متغیر Y فاصله نقطه قرارگیری آلودگی در جهت عرض کانال و تا پای آبشکن را نشان می دهد.

جدول (۵-۴) - مشخصات نقطه قرارگیری منبع آلودگی در Case D

$\frac{Y}{L}$	$\frac{X}{L}$	طول آبشکن (L) بر حسب متر
۱۹/۵	۳۹/۸	۰/۱
۹/۵	۲۰/۱۵	۰/۲
۶/۱۷	۱۳/۵۷	۰/۳
۴/۵	۱۰/۳۳	۰/۴
۳/۵	۸/۳	۰/۵
۲/۸۴	۶/۹۵	۰/۶
۲/۳۶	۶	۰/۷

در شکل (۵-۱۲)، نمودارهای توزیع آلودگی در Case D ترسیم شده است. در جدول (۵-۵) مشخصات مربوط به مدل سازی ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case D آورده شده است. جهت مشخص شدن طول گردابه در نتایج فاصله ۳/۳۸ تا ۱۱/۷۱ متری برای کل حالات مدل سازی Case D آورده شده است.



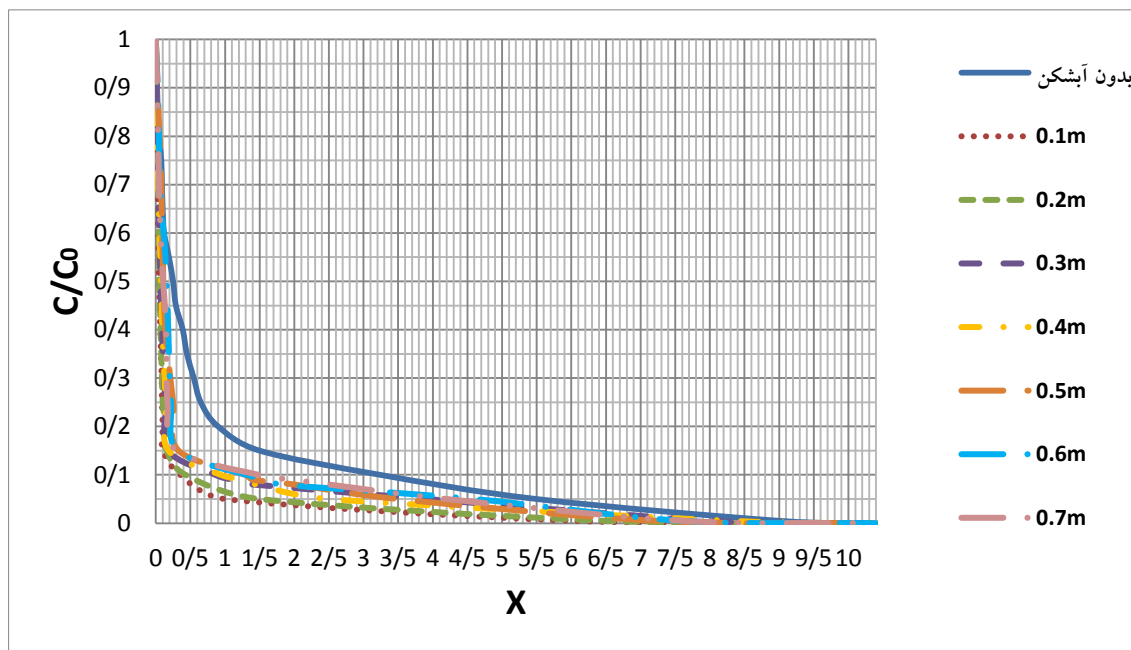
شکل (۵-۱۲) - توزیع آلودگی در Case D

جدول (۵-۵) - مشخصات مربوط به مدل سازی ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case D

نسبت بازشدگی (m)	طول گردابه تشکیل شده (m)	دبی عبوری ($\frac{m^3}{s}$)	ارتفاع آب (m)	عرض کانال (m)	عرض بازشدگی (m)	طول آبشکن (m)	ردیف
0	3.241	0.0661	0.1024	2	2	0	1
0.95	0.355	0.0661	0.1024	2	1.9	0.1	2
0.9	0.430	0.0661	0.1024	2	1.8	0.2	3
0.85	0.861	0.0661	0.1024	2	1.7	0.3	4
0.80	0.940	0.0661	0.1024	2	1.6	0.4	5
0.75	1.290	0.0661	0.1024	2	1.5	0.5	6
0.7	1.310	0.0661	0.1024	2	1.4	0.6	7
0.65	1.484	0.0661	0.1024	2	1.3	0.7	8

همان طور که در جدول (۵-۵) قابل مشاهده است در Case D آبشکن با طول ۰/۱ متر بهترین عملکرد را دارد و طول گردابه ها ناشی از آلودگی را از حالت بدون آبشکن با طول ۳/۲۴۱ متر به طول ۰/۳۵۵ متر کاهش داده است. در این حالت نیز مانند Case C آبشکن با طول ۰/۱ متر عملکرد مناسب تری داشته است و باید به این نکته توجه داشت که در تمام حالات وجود آبشکن تأثیر مثبت داشته و سبب کاهش طول آلودگی شده است.

چنانچه نمودار یک بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول کانال رسم نماییم، آنگاه می توان حالات مختلف آبشکن را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر ابعاد آبشکن بر طول آلودگی را نشان می دهد. قابل توجه است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع آبشکن) در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۱۳) این نمودار را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۳) - تأثیر افزایش ابعاد آبشکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case D

از شکل (۵-۱۳) استنباط می‌شود که در همه حالات وجود آبشکن تأثیر مثبت داشته و باعث کاهش طول آلودگی می‌شود. به‌طور کلی نقطه ورود آلودگی در مرکز گردابه نسبت به سایر حالات نتایج بهتری را ایجاد کرده است. علت این امر این است که تمام آلودگی به درون گردابه کشیده شده و به‌وسیله آن به‌خوبی پخش می‌شود به‌عبارت‌دیگر گردابه مانند یک همزن طبیعی عمل می‌کند. در این حالت آبشکن با طول ۰/۱ متر بهترین عملکرد را دارد و طول آلودگی را به ۰/۳۵۵ متر می‌رساند. این امر به این معنی است که چنانچه غلظت مجاز ۰/۱ غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از ۳/۲۴۱ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می‌رسیم، حال آنکه در کانالی با وجود آبشکن ۰/۱ متری پس از ۰/۳۵۵ متر به حد مجاز خواهیم رسید.

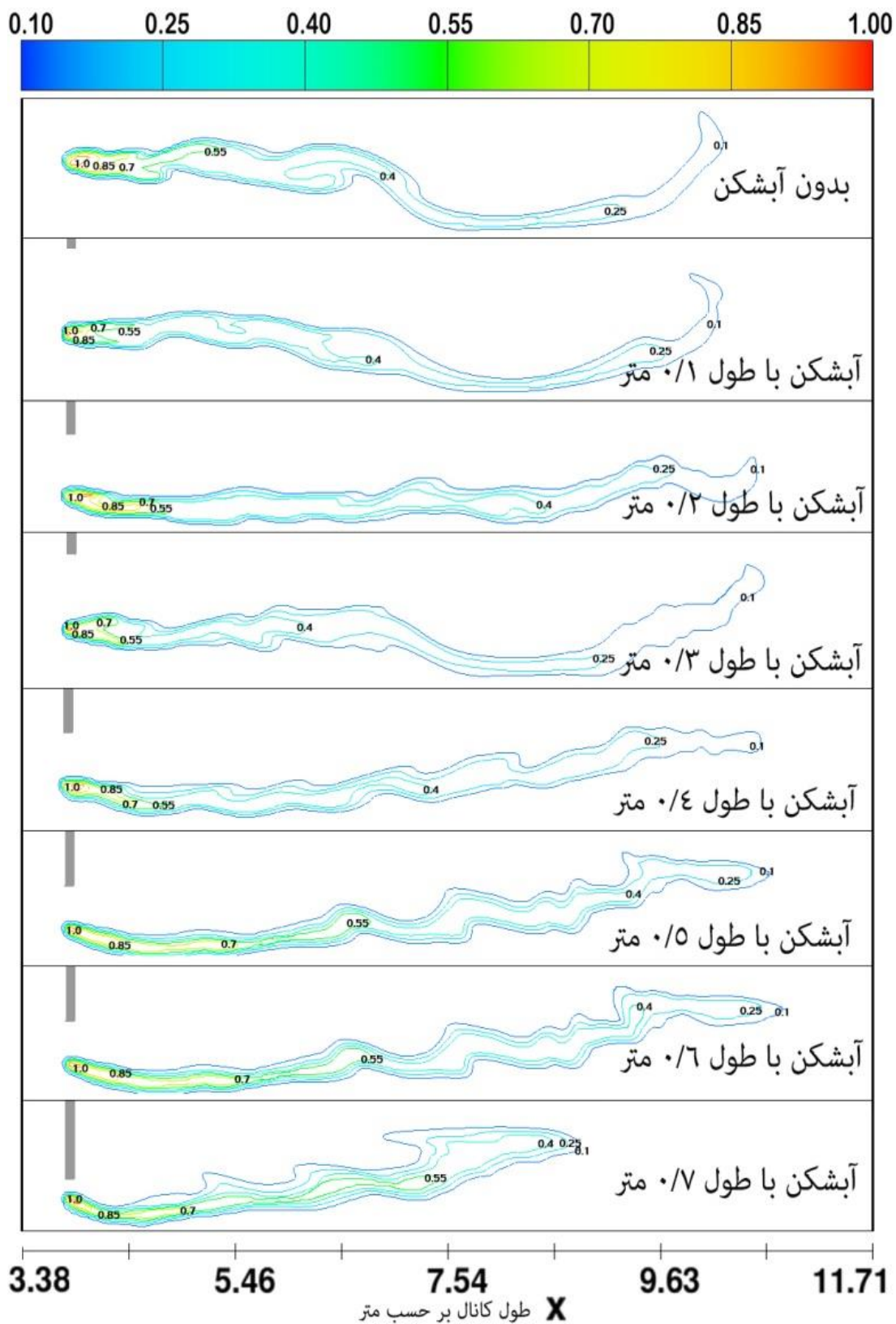
۵-۳-۵ Case E: ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال

شکل (۵-۱۴) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case E را در حالت آبشکن با ابعاد ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. در ادامه نمودارهای توزیع آلودگی در Case E ترسیم شده است. یادآور می‌شود که در ورود آلودگی در مرکز گردابه، تعیین مرکز گردابه با توجه به نمودارهای سرعت جریان در هر حالت به‌صورت جداگانه انتخاب شده است.



شکل (۵-۱۴) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case E

در شکل (۵-۱۵) نمودارهای توزیع آلودگی در Case E ترسیم شده است. در جدول (۵-۶) مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه‌ها تشکیل شده از آلودگی در Case E آورده شده است. جهت مشخص شدن طول گردابه، نتایج در فاصله $3/38$ تا $11/71$ متری برای کل حالات مدل‌سازی Case E آورده شده است.



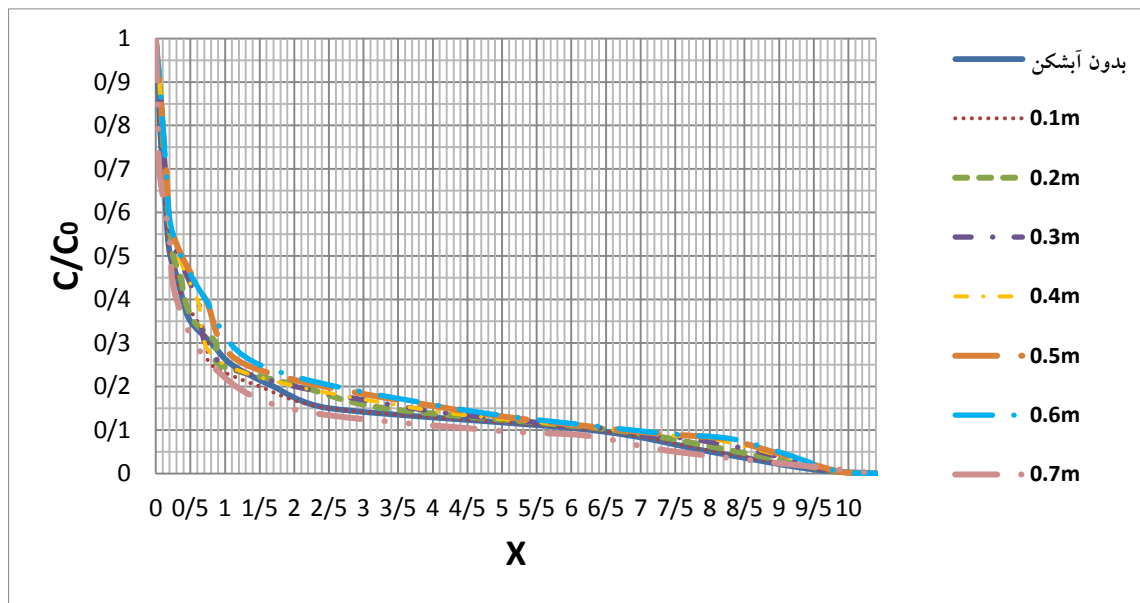
شکل (۵-۱۵) - توزیع آلودگی در Case E

جدول (۵-۶) - مشخصات مربوط به مدل سازی ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case E

نسبت بازشدگی (m)	طول گردابه تشکیل شده (m)	دبی عبوری ($\frac{m^3}{s}$)	ارتفاع آب (m)	عرض کانال (m)	عرض بازشدگی (m)	طول آبشکن (m)	ردیف
0	6.265	0.0661	0.1024	2	2	0	1
0.95	6.285	0.0661	0.1024	2	1.9	0.1	2
0.9	6.592	0.0661	0.1024	2	1.8	0.2	3
0.85	6.697	0.0661	0.1024	2	1.7	0.3	4
0.80	6.669	0.0661	0.1024	2	1.6	0.4	5
0.75	6.731	0.0661	0.1024	2	1.5	0.5	6
0.7	6.868	0.0661	0.1024	2	1.4	0.6	7
0.65	4.786	0.0661	0.1024	2	1.3	0.7	8

همان طور که در جدول (۵-۶) قابل مشاهده است در Case E آبشکن با طول ۰/۷ متر بهترین عملکرد را دارد و طول گردابه ناشی از آلودگی را از حالت بدون آبشکن با طول ۶/۲۶۵ متر به طول ۴/۷۸۶ متر کاهش داده است. در Case E استفاده از آبشکن نتیجه مطلوبی ارائه نداده است.

چنانچه نمودار یک بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول کانال رسم نماییم، آنگاه می توان حالات مختلف آبشکن را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر ابعاد آبشکن بر طول آلودگی را نشان می دهد. قابل توجه است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع آبشکن) در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۱۶) این نمودار را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۶) - تأثیر افزایش ابعاد آبشکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case E

از شکل (۵-۱۶) استنباط می‌شود که در همه حالات به جز حالت آبشکن ۰/۷ متری، وجود آبشکن تأثیر منفی داشته و باعث افزایش طول آلودگی می‌شود. به‌طور کلی ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض کانال نسبت به سایر حالات نتایج مطلوبی را ایجاد نکرده است. علت این امر این است که تمام آلودگی به درون گردابه‌ها کشیده شده و به‌وسیله آن به‌خوبی پخش می‌شود به‌عبارت‌دیگر گردابه‌مانند یک همزن طبیعی عمل می‌کند. در این حالت آبشکن با طول ۰/۷ متر بهترین عملکرد را دارد و طول آلودگی را به ۴/۷۸۶ متر می‌رساند. این امر به این معنی است که چنانچه غلظت مجاز ۰/۱ غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از ۶/۲۶۵ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می‌رسیم، حال آنکه در کانالی با وجود آبشکن ۰/۷ متری پس از ۴/۷۸۶ متر به حد مجاز خواهیم رسید.

۵-۳-۶ - Case F: ورود آلودگی در نقطه‌ای به فاصله‌ی طول آبشکن و از کناره کانال

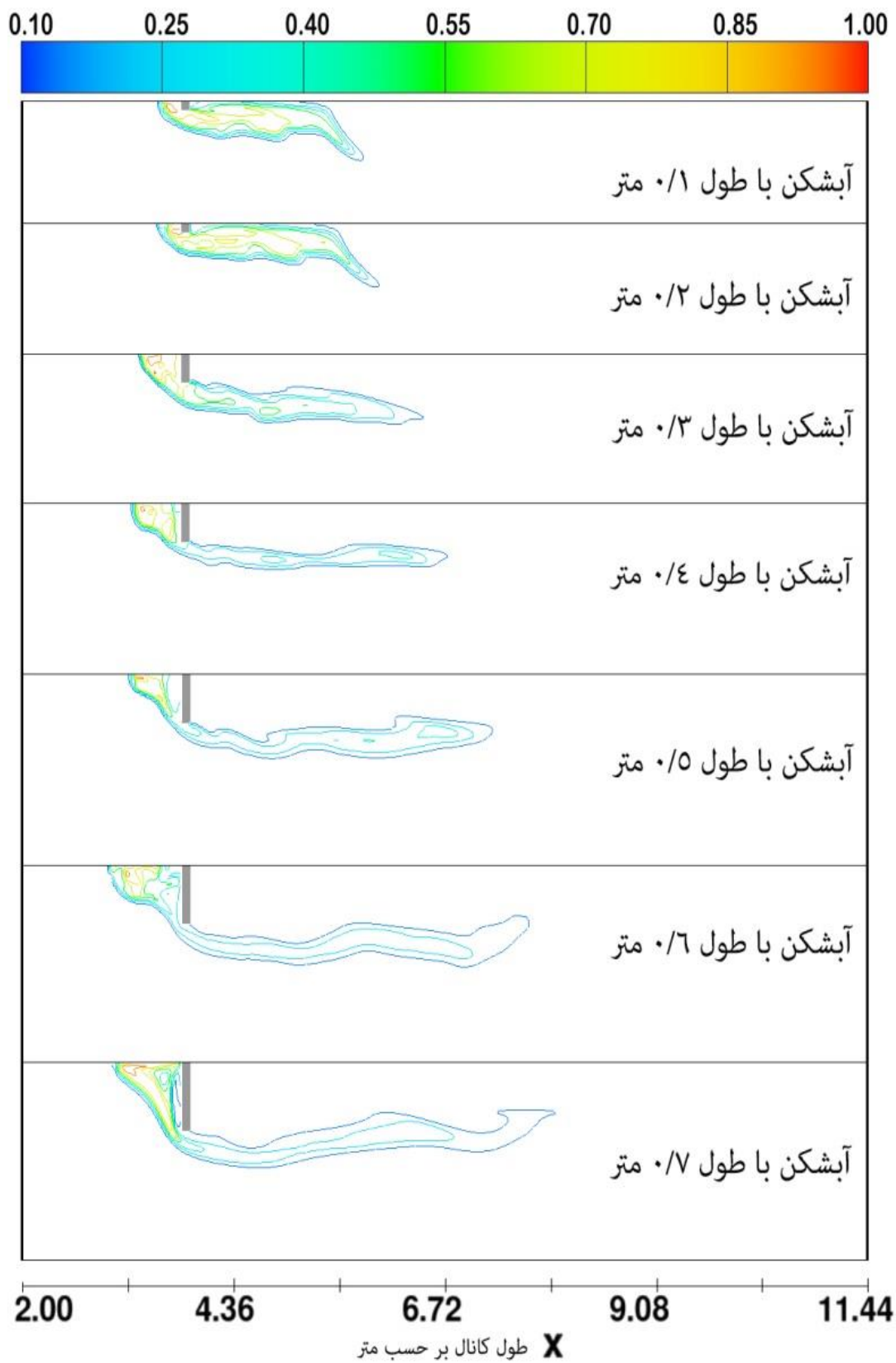
شکل (۵-۱۷) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case F را در حالت آبشکن با ابعاد ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. در ادامه نمودارهای توزیع آلودگی در Case F ترسیم شده است. یادآور می‌شود که در حال Case F

منبع ورود آلودگی در فاصله L قبل از آبشکن و از کناره کانال بوده که L همان طول آبشکن است.



شکل (۵-۱۷) - موقعیت نقطه ورود آلودگی Case F

در شکل (۵-۱۸) نمودارهای توزیع آلودگی در Case F ترسیم شده است. در جدول (۵-۷) مشخصات مربوط به مدل سازی ها و طول گردابه تشکیل شده از آلودگی در Case F آورده شده است. جهت مقایسه بهتر نتایج، تمامی حالات مدل سازی در Case F در یک شکل نمایش داده شده است.

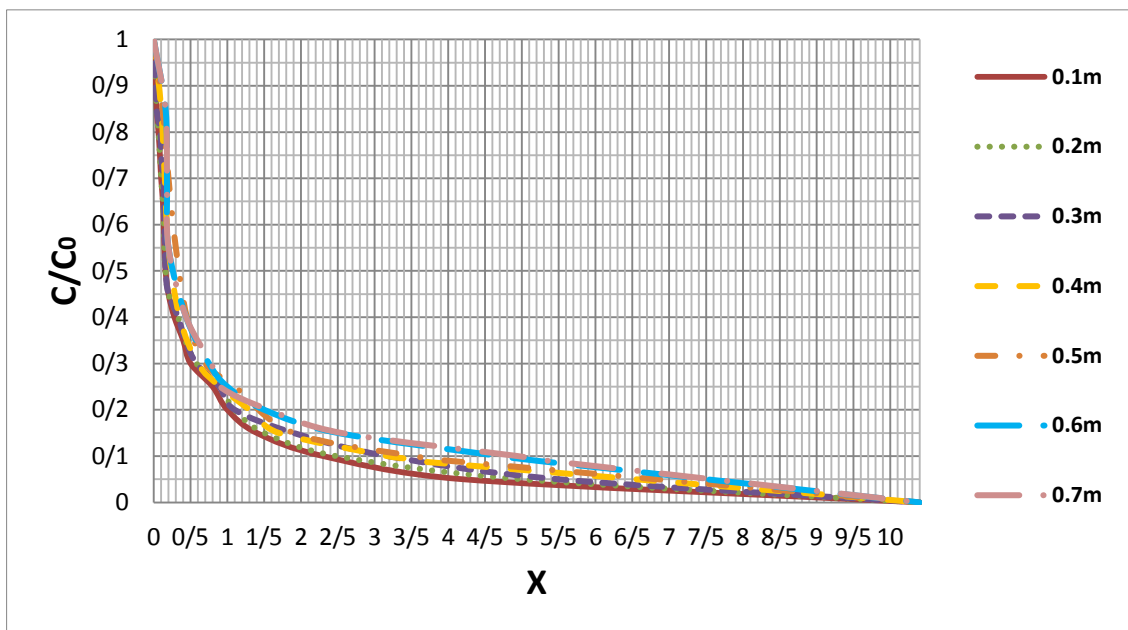


شکل (۵-۱۸) - توزیع آلودگی در Case F

جدول (۷-۵) - مشخصات مربوط به مدل‌سازی‌ها و طول گردابه تشکیل‌شده از آلودگی در Case F

نسبت بازشدگی (m)	طول گردابه تشکیل‌شده (m)	دبی عبوری ($\frac{m^3}{s}$)	ارتفاع آب (m)	عرض کانال (m)	عرض بازشدگی (m)	طول آب شکن (m)	ردیف
0.95	2.303	0.0661	0.1024	2	1.9	0.1	1
0.9	2.481	0.0661	0.1024	2	1.8	0.2	2
0.85	3.175	0.0661	0.1024	2	1.7	0.3	3
0.80	3.530	0.0661	0.1024	2	1.6	0.4	4
0.75	4.070	0.0661	0.1024	2	1.5	0.5	5
0.7	4.708	0.0661	0.1024	2	1.4	0.6	6
0.65	4.948	0.0661	0.1024	2	1.3	0.7	7

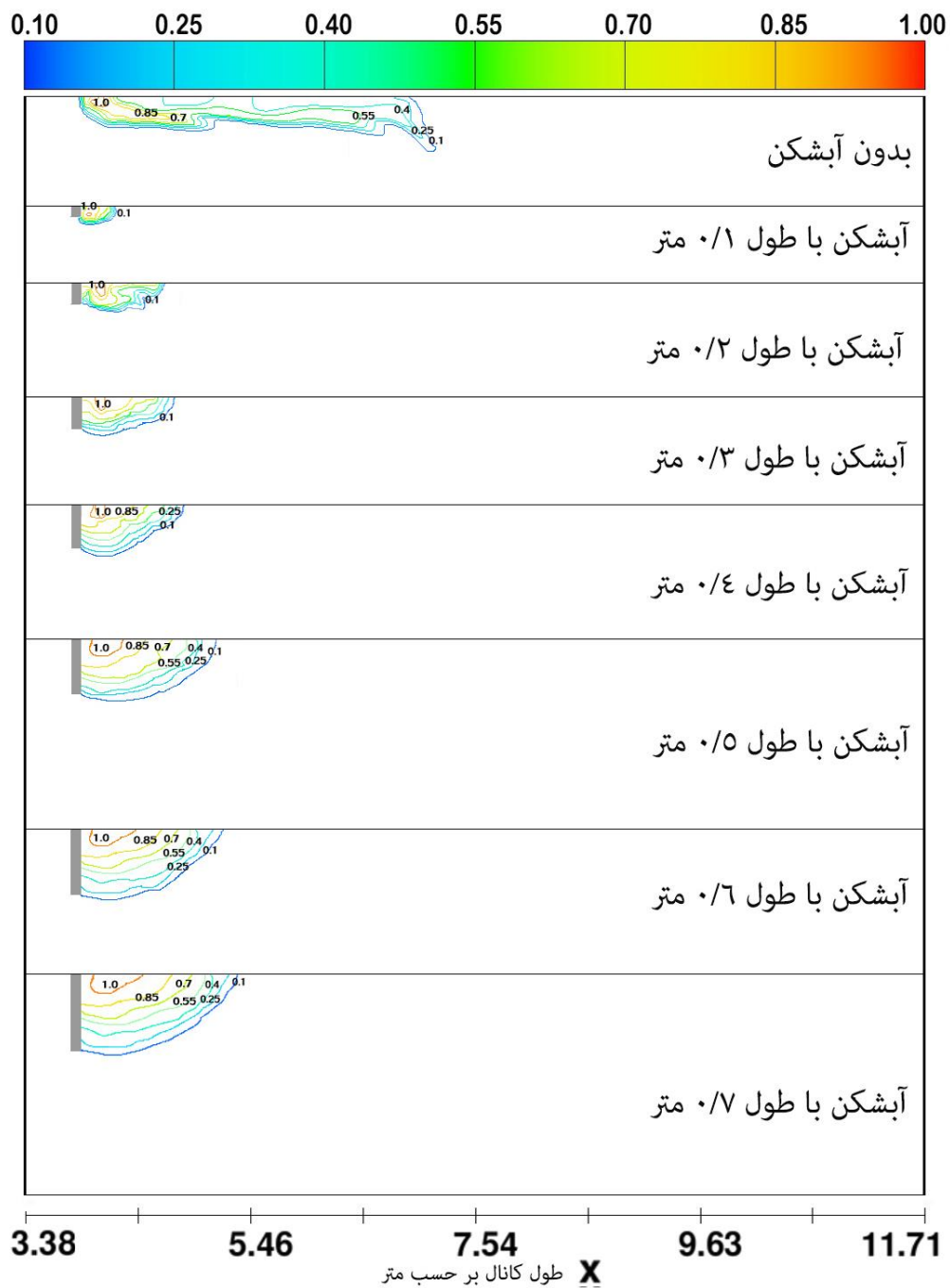
همان‌طور که در جدول (۷-۵) قابل مشاهده است در Case F آب‌شکن با طول ۰/۱ متر بهترین عملکرد را دارد و طول گردابه ناشی از آلودگی در این حالت کمترین مقدار شده است. آب‌شکن در Case E نتایج بسیار بهتری را از نشان می‌دهد، اما در مقایسه با Case D نتایج ضعیف‌تری را ایجاد کرده است. چنانچه نمودار یک‌بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول کانال رسم نماییم، آنگاه می‌توان حالات مختلف آب‌شکن را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر ابعاد آب‌شکن بر طول آلودگی را نشان می‌دهد. قابل توجه است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع آب‌شکن) در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۱۹) این نمودار را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۹) - تأثیر افزایش ابعاد آب‌شکن، به توزیع آلودگی در طول کانال در Case F

۵-۴ - تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر توزیع آلودگی:

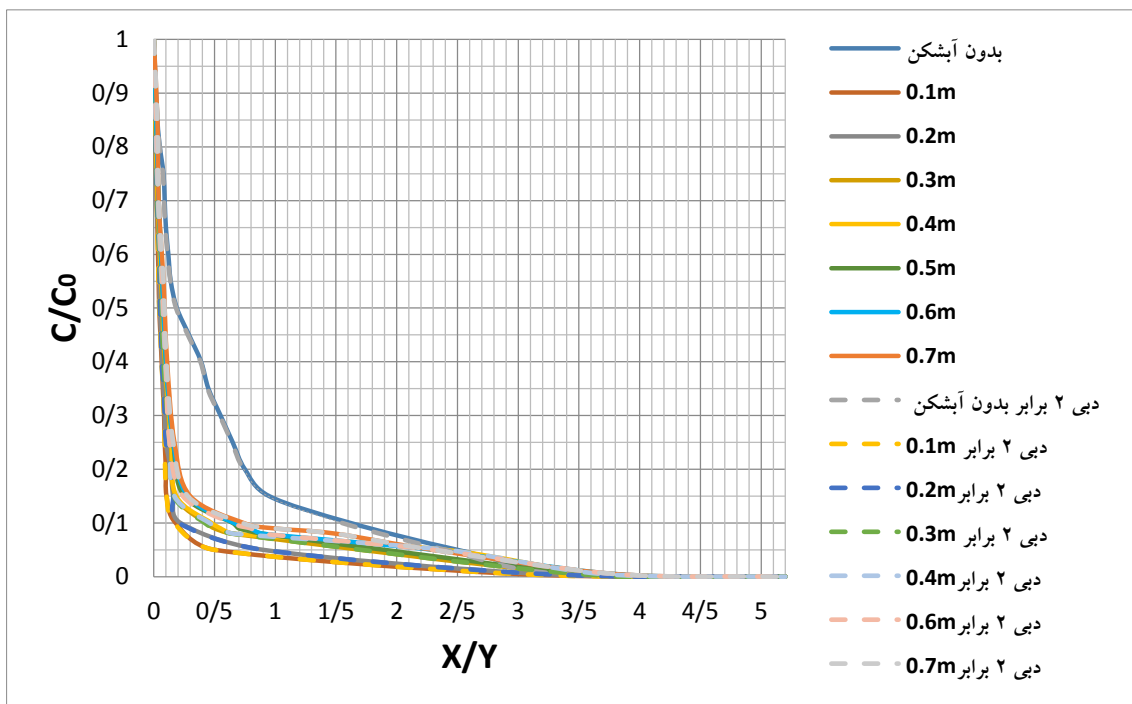
حال که تأثیر نقاط ورود مختلف بر توزیع آلودگی تعیین شد، بهتر است بینیم تغییر در شرایط هیدرولیکی جریان چه تأثیری بر توزیع آلودگی خواهد گذاشت. برای این منظور دبی عبوری از کانال را با فرض ثابت ماندن ارتفاع آب دو برابر می‌کنیم همچنین با ثابت نگه‌داشتن شرایط، عمق ورود آلودگی در ۲ حالت کف کانال و وسط کانال نیز بررسی شده است. این عمل را برای حالت بهینه یعنی Case D با آب‌شکن ۰/۱ متری انجام داده‌ایم و نتایج را باحالت‌های قبل مقایسه نموده‌ایم. دبی از $۰/۰۶۶۱ \left(\frac{m^3}{s}\right)$ به مقدار $۰/۱۳۲۲ \left(\frac{m^3}{s}\right)$ افزایش یافته است. در شکل (۵-۲۰) نمودار توزیع آلودگی برای دبی $۰/۱۳۲۲ \left(\frac{m^3}{s}\right)$ رسم شده است.



شکل (۵-۲۰) - نمودار توزیع آلودگی برای دبی $0.1322 \text{ (m}^3/\text{s)}$

برای مقایسه بهتر، دو Case D با دبی‌های $0.0661 \text{ (m}^3/\text{s)}$ ، $0.1322 \text{ (m}^3/\text{s)}$ بر روی نمودار ترسیم شده

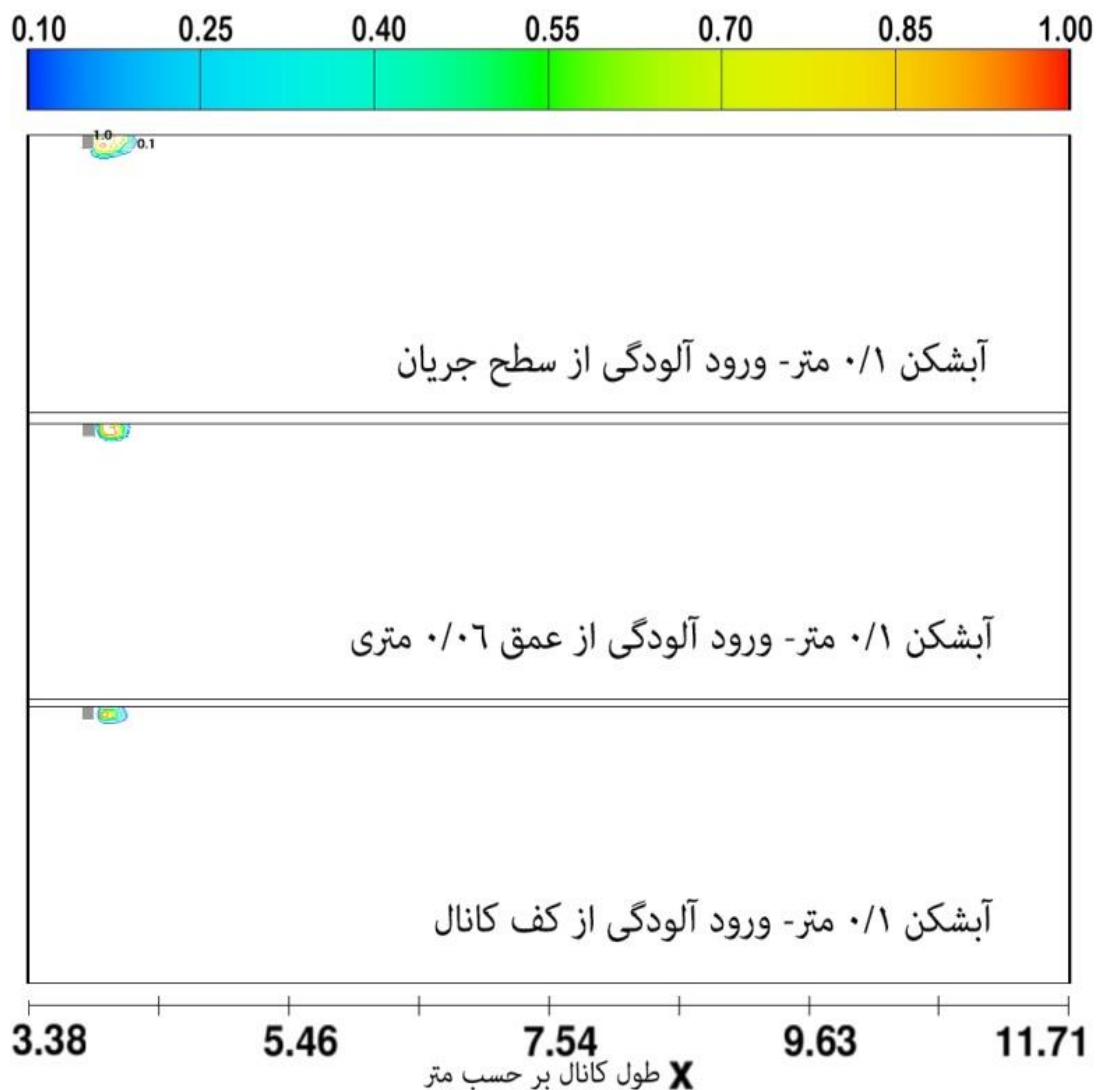
است. شکل (۵-۲۱) این نمودار را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۱) - مقایسه نتایج توزیع آلودگی در دبی‌های $0.1322 \text{ (m}^3/\text{s)}$ و $0.0661 \text{ (m}^3/\text{s)}$ در Case D

با افزایش دبی (در واقع سرعت) سرعت گردابه نیز افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه اختلاط و پخش بیشتر آلودگی توسط گردابه انجام می‌شود که این مطلب باعث کم شدن فاصله برای رسیدن به حد مجاز غلظت شده و در نتیجه طول آلودگی کمتر می‌گردد. افزایش سرعت باعث بزرگ شدن ضرایب انتشار نیز می‌گردد و پدیده انتشار بیش از پدیده انتقال، افزایش می‌یابد.

پس از بررسی افزایش دبی به بررسی تغییر در عمق ورود آلودگی پرداخته شده است. در این حالت مدل‌سازی که بهترین نتیجه را ارائه داده است یعنی Case D با آبشکن 0.1 متری در حالت ۳، ورود جریان آلودگی از سطح جریان، از وسط عمق جریان داخل کانال (0.06 متر) و از کف کانال مدل کرده و نتایج را تحلیل نموده‌ایم. نتایج مقایسه‌ای برای حالت ۳ مدل‌سازی در شکل (۵-۲۲) قابل ملاحظه است.



شکل (۵-۲۲) - تأثیر عمق بر توزیع آلودگی نقطه‌ای در کانال در Case D

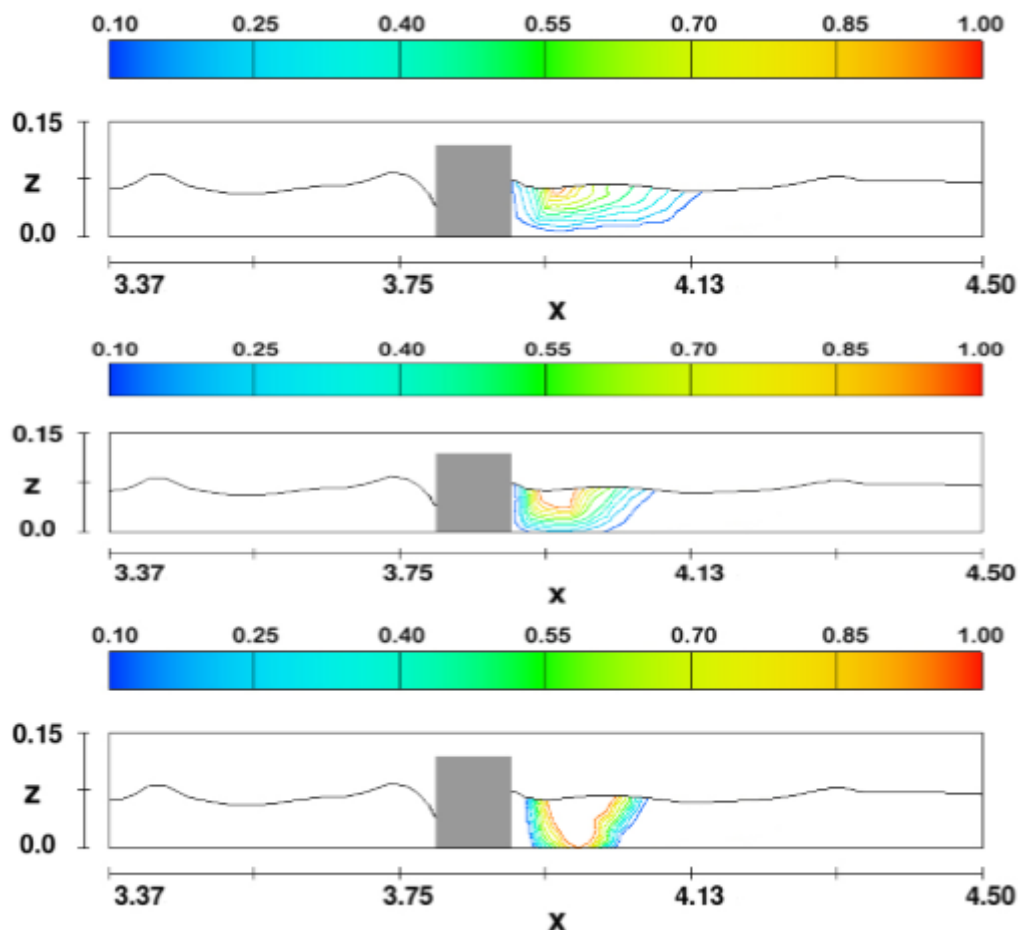
همان‌طور که از شکل (۵-۲۲) مشخص است با افزایش عمق طول آلودگی کاهش پیدا خواهد کرد. در نتیجه با تغییر محل ورود آلودگی به کف کانال طول مورد نیاز جهت رسیدن به غلظت مجاز ۰/۱ کاهش خواهد یافت.

در Case D در صورتی که آلودگی از کف کانال وارد شود طول گردابه تشکیل شده کمترین، و در صورتی که آلودگی از سطح جریان وارد شود، طول آلودگی بیشترین است. جدول (۵-۸) تأثیر عمق در پخش و انتقال آلودگی در Case D را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۸) طول گردابه ها با در نظر گرفتن اثر عمق در Case D

طول گردابه تشکیل شده (متر)	محل ورود آلودگی
۰/۳۵۵	سطح آب
۰/۲۵۴	وسط عمق کانال
۰/۲۱۷	کف کانال

شکل (۵-۲۳) توزیع آلودگی در اعماق مختلف در حالت بهینه مدلسازی یعنی Case D را نشان میدهد. در واقع از آنجا که شکل در صفحه ی X-Z رسم شده است حرکت ذره آلوده بر روی سطح آب و ورود آن به سطوح مختلف سطح آب نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۳) - نمایش توزیع آلودگی در مقطع X-Z و چند تراز مختلف در عمق

شکل (۵-۲۴) به مقایسه تمامی مدل‌های انجام‌شده می‌پردازد.



شکل (۵-۲۴) - مقایسه بین مدل‌سازی‌های متفاوت در توزیع آلودگی

همان‌طور که از شکل اخیر مشخص است، در مدل Case D یعنی محل قرارگیری آلودگی در مرکز گردابه بهترین نتایج حاصل شده است.

فصل ششم: نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۶-۱- مقدمه:

علیرغم اینکه نرم‌افزارهای تجاری گوناگونی بر پایه CFD جهت مدل‌سازی جریان سیال، تعیین غلظت مواد حل‌شده در آب و توزیع آلودگی وجود دارد، لیکن انتخاب بهترین آن‌ها جهت مدل‌سازی چالشی است که بر پایه محاسبات متعدد با انواع نرم‌افزارها به دست خواهد آمد. نرم‌افزار FLOW-3D می‌تواند مطابق با محدودیت‌های مختلف معادلات کلی سیال، به چندین روش عمل کند، به‌عنوان مثال، روش‌هایی که برای جریان تراکم پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش دیگری که برای جریان غیرقابل تراکم به کار می‌رود که در مورد دوم دانسیته و انرژی ثابت است و نیاز به محاسبه ندارد. در این مطالعه تأثیر توزیع آلودگی در مسیر پس از عبور جریان از آب‌شکن‌ها با طول‌های متفاوت، به‌وسیله نرم‌افزار FLOW-3D بررسی شد. نتایج نشان داد گردابه‌های ناشی از وجود آب‌شکن سبب آشفتگی جریان و اختلاط بهتر آلودگی شده و طول ناحیه آلوده را کاهش می‌دهد. کاهش طول ناحیه‌ای از مسیر که در آن آلودگی فراتر از حد مجاز است، در واقع یک مصلحت مهندسی است.

۶-۲- نتیجه‌گیری:

از نتایج فصل قبل نتایج ذیل قابل استنباط است:

- چنانچه بخواهیم طول ناحیه آلوده (L) را کاهش دهیم، می‌توانیم به کمک تعبیه یک آب‌شکن منفرد در مسیر به این مهم دست‌یابیم. البته در این حالت توجه به نقطه ورود آلودگی اهمیت بسیار زیادی خواهد داشت.
- برای حصول بهترین نتیجه، انتخاب مناسب‌ترین نقطه ورود آلودگی بسیار مؤثر است، حتی در مسیرهایی که فاقد آب‌شکن هستند نیز انتخاب موقعیت ورود آلودگی مناسب (چه در طول رودخانه و چه در عرض آن) اهمیت بسزایی دارد. به‌بیان دیگر می‌توان با بررسی پلان مسیر مثلاً در یک رودخانه، موقعیت‌های تشکیل گردابه‌های طبیعی در بستر رودخانه را شناسایی نموده، و آلودگی را دقیقاً از همین نقاط وارد رودخانه نماییم.

• استفاده از آبشکن با طول کمتر (مانند حالت ۰/۲ یا ۰/۱) مناسب تر است زیرا باعث کاهش

طول ناحیه آلوده شده، همچنین در هزینه ساخت نیز کاهش می یابد.

اگرچه تعبیه آبشکن باعث کاهش چشمگیر طول ناحیه آلوده می شود اما به هر حال مشکلاتی از قبیل اثرات تخریبی گردابه، تغییر در اکوسیستم اطراف، افزایش سرعت جریان در قبل از آبشکن و در نتیجه شدت یافتن فرسایش بستر رودخانه نیز از جمله مواردی هستند که توجه پذیری آن ها را نیازمند مطالعات اقتصادی می کند.

۳-۶- پیشنهادهای برای پژوهش های آتی:

پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی، موارد زیر مورد بررسی واقع شوند:

- ✓ بررسی اثرات رسوب گذاری و فرسایش جداره کانال بر توزیع آلودگی
 - ✓ بررسی اثرات شکل آبشکن ها بر جریان شکل گرفته اطراف هر یک و نیز توزیع آلودگی. به طور مثال به جای استفاده از آبشکن مستطیلی از انواع L شکل یا انواع دیگر استفاده نمود.
 - ✓ در این پژوهش تنها اثر یک آبشکن منفرد نفوذناپذیر مورد بررسی قرار گرفته، می توان اثرات سری آبشکن ها و یا آبشکن های نفوذپذیر را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرارداد.
 - ✓ بررسی اثر پخش آلودگی در مورد آبشکن های با زاویه غیر عمود بر ساحل
- بررسی های انجام شده در این پژوهش بر اساس هر دو مدل دویعدی و سه بعدی بوده در نتیجه تأثیر پارامتر عمق جریان نیز در نظر گرفته شده است. به طور قطع استفاده از واسط گرافیکی جهت ارائه بهتر نتایج و نیز مدل سازی آسان تر محدوده مطالعاتی در جلب نظر کاربر و درک هرچه بهتر مطالب و گزارش ها مفید خواهد بود.

منابع:

۱. امین نژاد ب، صانعی م، (۱۳۸۶) "انواع آب‌شکن و معادلات حاکم بر شبیه‌سازی دوبعدی جریان در اطراف آب‌شکن"، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، دانشگاه شهید باهنر، انجمن مهندسی آبیاری و آب.
۲. "حکیم زاده ح، غال دربندی ر، (۱۳۸۶) "شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان اطراف آب‌شکن‌های عمود بر ساحل و مایل با در نظر گرفتن شرایط مرزی مختلف" سال چهارم، شماره ۸،
۳. شفایی الف، (۱۳۸۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بررسی آزمایشگاهی تأثیر نسبت طول و زاویه‌ی آب‌شکن اصلی بر آب‌شکن فرعی" دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴. کرمی مقدم م و سیدیان م، (۱۳۸۷) "بررسی الگوی جریان در آبگیر ۵۵ درجه با گرد شدگی ورودی با استفاده از مدل *SSIM2* و مقایسه آن با مدل فیزیکی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران
۵. ارسائی ع، احمدی محمدم، قادری ک، (۱۳۹۱) "مدل‌سازی عددی انتشار آلودگی در رودخانه‌ها به کمک محاسبات کسرهای جزئی" همایش ملی جریان و آلودگی آب دانشگاه تهران
۶. ناصری س، قانعیان م ت، (۱۳۸۱) "مدیریت کیفیت آب در دریاچه‌ها و رودخانه‌ها"، موسسه علمی فرهنگی نص (تهران).
۷. مددیان م و عابدینی ا، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بررسی تأثیر آب‌شکن در نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده‌ساز نقطه‌ای"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۸. مهاجرم و، امینی ر (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "مدلینگ جریان پساب صنعتی در رودخانه‌ها استفاده از *cfD* به منظور مدیریت منابع آب و محیط‌زیست (مطالعه موردی پتروشیمی بجنورد)"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود
۹. دبیری م (۱۳۷۹) "آلودگی محیط‌زیست - هوا - آب - خاک - صوت"، نشر اتحاد
۱۰. کرمی ث و غواصیه ا، ر، (۱۳۸۸) "شبیه‌سازی عددی گسترش آلودگی در محیط رودخانه و بررسی عوامل مؤثر در آن" مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده فنی دانشگاه تهران
۱۱. "راهنمای مطالعات ظرفیت خود پالایی رودخانه‌ها"، نشریه شماره ۴۸۱. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، وزارت نیرو
۱۲. کی نژاد م. ع و ابراهیمی س "مهندسی محیط‌زیست"، دانشگاه صنعتی سهند

۱۳. طهماسبی بیرگانی و محسنی ی، (۱۳۸۸) "تأثیر پارامترهای هیدرولیکی رودخانه در انتشار لحظه‌ای آلاینده" مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز
۱۴. مشعل، م. (۱۳۸۶) "هیدرولیک در مهندسی عمران و محیط‌زیست"، انتشارات دانشگاه تهران
۱۵. انصاری پور ا. ح. و ابراهیمی ک، (۱۳۹۰) "مقایسه حل تحلیلی و روش‌های عددی در مقابل داده های آزمایشگاهی در پیش‌بینی حرکت آلودگی در جریان‌های یک‌بعدی"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۱۶. مخبری ف. ا. (۱۳۷۷) "روش‌های آزمایش آب. فاضلاب، خاک"، انتشارات دانشگاه تهران
۱۷. شمسی ا. ط. (۱۳۷۹) "هیدرولیک محاسباتی" انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
18. Pletcher, R. H., Tannehill, J. C., & Anderson, D. (2012). "**Computational fluid mechanics and heat transfer**". CRC Press.
۱۹. ریاحی مدوار ح و ایوب زاده س. ع. ر، (۱۳۸۷) "تخمین ضریب پراکندگی طولی آلودگی با استفاده از سیستم استنتاج فازی - عصبی انطباقی"، فصلنامه آب و فاضلاب ۱۹ (۶۷)
20. Barry, D. A. and G. Sposito (1989). "Analytical solution to a convection-dispersion Model time-dependent transport coefficients." **Water Resour Research** 25(12): 2407-2416.
21. Yadav, R. R., D. K. Jaiswal, et al. (2010). "Analytical solution of one dimensional Temporally dependent advection-dispersion equation in homogeneous porous Media." **International Journal of Engineering, Science and Technology** Vol. 2: 141-148.
22. Chao, X., Jia, Y., & Shields, Jr, F. D. (2004). "Three-dimensional numerical simulation of flow and mass transport in a Shallow Oxbow Lake". **In Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management** (pp. 1-10).
23. Kumar, A., Jaiswal, D. K., & Kumar, N. (2009). "Analytical solutions of one-dimensional advection-diffusion equation with variable coefficients in a finite Domain". **Journal of Earth System Science**, 118(5), 539-549.
24. Marsily, G. D., & de Marsily, G. (1986). "Quantitative hydrology"; **Groundwater hydrology for engineers** (No. 04; GB1001. 72. M37, M3.).
25. Benton, E. R., & Platzman, G. W. (1972). "A table of solutions of the one-dimensional Burgers equation". **Quarterly of Applied Mathematics**, 30(2), 195-212.
۲۶. نجفی جیلانی ع و بنی‌هاشمی م، (۱۳۸۰) "کاربرد روش‌های عددی دقیق در مدل‌سازی توزیع آلودگی در رودخانه‌ها" سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

۲۷. پارسائی ع و احمدی م "مدل سازی عددی انتشار آلودگی در رودخانه‌ها به کمک محاسبات کسرهای جزئی" همایش ملی جریان و آلودگی آب. دانشگاه تهران

28. Neary, V. S., & Odgaard, A. J. (1993). "Three-dimensional flow structure at open-channel diversions" **Journal of Hydraulic Engineering**, 119(11), 1223-1230.

29. Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., & Shields, F. D. (1999). "Geometry of scour holes associated with 90 spur dikes" **Journal of Hydraulic Engineering**, 125(9), 972-978.

30. Sukhodolov, A., & Uijttewaal, W. S. (2002). "On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields". **Earth Surface Processes and Landforms**, 27(3), 289-305.

31. Uijttewaal, W. S. J., Lehmann, D. V., & Mazijk, A. V. (2001). "Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments". **Journal of Hydraulic Engineering**, 127(11), 928-936.

32. Azinfar, H., & Kells, J. A. (2009). "Flow resistance due to a single spur dike in an open channel" **Journal of Hydraulic research**, 47(6), 755-763.

33. Gu, Z. P., Akahori, R., & Ikeda, S. (2011). "Study on the transport of suspended sediment in an open channel flow with permeable spur dikes". **International Journal of Sediment Research**, 26(1), 96-111.

34. Chen, L. P., Jiang, J. C., Deng, G. F., & Wu, H. F. (2012). "Three-dimensional modeling of pollutants transportation in the flow field around a spur dyke" **International Journal of Sediment Research**, 27(4), 510-520.

35. Kang, J., Yeo, H., & Kim, C. (2013). "Assessment of Habitats According to Groyne Types (Using Pale Chub)". **Engineering**, 5(01), 22.

36. Gu, Z., Cao, X., Jiao, Y., & Lu, W. Z. (2016) "Appropriate CFD Models for Simulating Flow around Spur Dike Group along Urban Riverways" **Water resources management**, 30(13), 4559-4570.

۳۷. صفرزاده الف و صالحی نیشابوری ع.الف، (۱۳۸۳) "مدل سازی عددی الگوی سه بعدی جریان در آبگیر جانبی" اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳۸. حسن زاده ی، حکیم زاده ح، دل افروز ه، سرورام ح، (۱۳۸۶) "تهیه مدلی عددی برای شبیه سازی

- الگوی جریان اطراف یک آبشکن "ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد
۳۹. دربندی ر، کشاورز م.ح و حکیم زاده ح، (۱۳۸۷) "تحلیل عددی سه بعدی الگوی جریان در اطراف آبشکن مستغرق و غیر مستغرق"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران
۴۰. الیاسی س و اقبال زاده الف، (۱۳۹۱)، "شبیه سازی عددی الگوی جریان و سطح آزاد در اطراف یک آبشکن مستغرق در کانال مستقیم شیب دار با استفاده از نرم افزار FLOW3D"، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان
41. Ouillon, S., & Dartus, D. (1997). "Three-dimensional computation of flow around groyne" *Journal of hydraulic Engineering*, 123(11), 962-970.
42. Xin, Y., Xuelin, T., Wuchang, W., Fujun, W. A. N. G., Zhicong, C. H. E. N., & Xiaoyan, S. H. I. (2010). "A lattice Boltzmann model coupled with a Large Eddy Simulation model for flows around a groyne" *International Journal of Sediment Research*, 25(3), 271-282.
۴۳. باصر ح، اردشیر ع و کرمی ح، (۱۳۹۰) "مدل سازی الگوی جریان پیرامون آبشکن ها در بستر صلب" چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
44. Kafle, M. R. (2014) "Numerical Simulation of Flow around a Spur Dike with Free Surface Flow in Fixed Flat Bed" *Journal of the Institute of Engineering*, 9(1), 107-114
45. Fang, H., Bai, J., He, G., & Zhao, H. (2013). "Calculations of nonsubmerged groin flow in a shallow open channel by large-eddy simulation" *Journal of Engineering Mechanics*, 140(5), 04014016.
46. Ali, M., Hasan, M., & Haque, M. (2017) "Two-Dimensional Simulation of Flows in an Open Channel with Groin-Like Structures" by iRIC Nays2DH. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
47. Piasecki, M., & Katopodes, N. D. (1997) "Control of contaminant releases in rivers. II: Optimal design" *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(6), 493-503.
۴۸. شجاعی فرد م و نورپور هشترودی ع، (۱۳۷۹) "مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی CFD" انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
49. Sanieinejad, M. (2009). "Fundamentals of turbulent flows and turbulence modeling". *Daneshnegar, Tehran*.

Abstract

Rivers as one of the sources of surface water receive wastewater from human activities and with the help of the advection-diffusion process, they dilute pollution on river path and reduce the density. This property, which is known as self-attenuation, enables the release of the contaminated wastewater into the rivers while the average water quality in the river remains acceptable for various purposes. The dilution process takes a minimum distance which depends on the contaminant concentration and entrance position as well as hydraulic conditions such as velocity and angle of attacks. Reduction of this length is of engineering interests since the region of high concentration pollution is confined. Therefore by increasing turbulence in water, the mixing length will be decreased. A method to increase the turbulence is to use spur dikes. In this investigation, the numerical simulation of the flow is done by the Flow-3D software in a rectangular channel. There are three main parts in this study including: the flow without taking into consideration pollution. The flow streams resulting from simulation was totally in accordance with experimental data. The second main part was to simulate the flow by taking into consideration pollutant entrance. The third and the most important one, was to study the effect of geometrical characteristics of spur dike and flow rate change. To do so, spur dikes of length 0.1 to 0.7 meter have been used. Finally, the effects of different points of pollutant entrance and depth parameter on the pollution dispersion has been discussed. The LES turbulence model is used in this investigation.

The results show that, changes made in the location of pollution source and spur dike, heavily affect pollutant release Such that by locating pollution in the center of the eddy, and pollution entrance from channel tray, the best results have been achieved.

Keywords: Spur dike, Distribution of pollution, Advection - Diffusion Equation, Flow-3D, turbulence model of LES



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

Investigation of Spur dike Effects on Pollution Diffusion

By: Ali Montazeri

Supervisor:
Dr Amir Abbas Abedini

Jan 2018