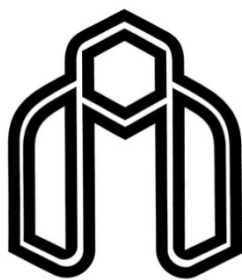


مَوْلَانَا مُحَمَّدٌ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : عمران

گروه : سازه های هیدرولیکی

بررسی تأثیر نسبت بازشدگی کانال به نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده ساز نقطه ای

دانشجو : محمد مددی یان

اساتید راهنما :

دکتر سید فضل الله ساغروانی

دکتر امیر عباس عابدینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : عمران

گروه : سازه های هیدرولیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد مددی یان

تحت عنوان: بررسی تأثیر نسبت بازشدگی کانال به نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده ساز نقطه ای

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۲۹ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه بسیار خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : سید فضل الله ساغروانی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : امیر عباس عابدینی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمود چهار طاقی
	حسین قاسم زاده		نام و نام خانوادگی : مهدی عجمی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار
قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار
حکمت او در دل شب تار، درخشان. آفریدگاری که
خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما
گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده
ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید

آنچه را که در صفحاتی چند تقدیمتان خواهد شد، ثمره تلاش بالغ بر یک سال منسوبین علم و دانش است. تلاشی که هدف از آن کسب تجربه ای است که اگر چه به غایت کوچک، ولی برای شروع راهی که به آرزوی فردای بهتر می رسد، بسی ارزنده است.

ما در راه کسب این تجربه از مشایعت و مشارکت فکری اساتید ارجمند جناب آقای دکتر ساغروانی و جناب آقای دکتر عابدینی که همواره با رویی بشاش و سعه صدری شایسته ما را راهنما بوده اند و دین سپاسگزاری از ایشان را همواره بر گردن داریم، بهره ها بردیم. و در این راه از تجارب سایر دوستانمان نیز سود جستیم، و این دستاورد را نیز به گنجینه آیندگان پیشکش می کنیم. با اذعان به این واقعیت که هیچ تجربه ای فاقد کم و کاست نیست که فقط نا نوشته بدون غلط است.

تعهد نامه

اینجانب محمد مددی یان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران – سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر نسبت بازشدگی کانال به نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده ساز نقطه ای تحت راهنمایی آقایان دکتر ساغروانی و دکتر عابدینی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

رودخانه ها و آب های سطحی راهی برای انتقال آلاینده ها به محیط زیست و انسان می باشند. رودخانه ها 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. این ویژگی خود پالایی رودخانه ها، جوامع را قادر می سازد که فاضلاب آلوده خود را به درون رودخانه ها رها سازند؛ در حالی که میانگین کیفیت آب رودخانه ها برای اهداف مختلف قابل قبول باقی می ماند. پخش آلودگی به حداقلی از مسافت نیاز دارد تا فرآیند پخش و اختلاط به طور کامل انجام شود. این مسافت وابسته به غلظت آلودگی، شرایط هیدرولیکی رودخانه، شرایط هیدرولیکی ورود فاضلاب مانند سرعت، زاویه ورود به آبراهه اصلی و مواردی مانند آن است. از آنجا که در طول این مسافت غلظت آلودگی فراتر از حد مجاز است، در نتیجه کاهش این مسافت یک مصلحت مهندسی است. یکی از راه های کاهش این طول افزایش اختلاط در آب به کمک افزایش آشفتگی در جریان است. یک روش افزایش آشفتگی، عبور جریان از یک بازشدگی ناگهانی است. در این پژوهش اثر نقاط مختلف ورود آلودگی، نسبت های مختلف بازشدگی و سرعت های مختلف جریان در توزیع آلودگی بوسیله مدل دو بعدی توزیع آلودگی که به زبان های برنامه نویسی Fortran و Matlab نوشته شده است، بررسی می شود. نتایج نشان داد که بازشدگی های ناگهانی با نسبت بازشدگی ۰/۱ تا ۰/۲ کارآمدتر است.

کلمات کلیدی: معادله انتقال - انتشار، انتشار آلودگی، روش حجم محدود، بازشدگی ناگهانی

فهرست

- ۱- فصل اول - مقدمه ۱
- ۱-۱ مقدمه : ۲
- ۲-۱ اهمیت بررسی نحوه توزیع آلودگی : ۲
- ۳-۱ هدف پایان نامه : ۳
- ۲- فصل دوم - توزیع آلودگی در آبراهه ها ۵
- ۲-۱ تعریف آلودگی : ۶
- ۲-۲ انواع روش های ورود آلاینده ها : ۶
- ۲-۳ طبقه بندی انواع آلودگی ها: ۷
- ۲-۳-۱ طبقه بندی آلودگی ها از نظر منبع تولید : ۷
- ۲-۳-۲ طبقه بندی آلودگی ها از نظر کیفیت : ۸
- ۲-۳-۳ طبقه بندی هیدرولیکی آلودگی : ۱۰
- ۲-۴ نحوه توزیع آلودگی : ۱۰
- ۲-۴-۱ آزمایش های کیفیت آب : ۱۱
- ۲-۴-۱-۱ آزمایش های فیزیکی : ۱۱
- ۲-۴-۱-۲ آزمایش های شیمیایی : ۱۱
- ۲-۴-۱-۳ آزمایش های میکرو بیولوژیکی : ۱۱
- ۲-۴-۲ آنالیز کیفی رودخانه : ۱۲
- ۲-۴-۳ استاندارد کیفیت و حدود مجاز کیفی پساب : ۱۵
- ۲-۴-۴ روش های تقریبی : ۱۷
- ۲-۴-۵ روش های ریاضی : ۱۷
- ۲-۴-۵-۱ آلودگی با چگالی یکسان آلاینده و محیط پذیرنده : ۱۸
- ۲-۴-۵-۲ مدل ریاضی پدیده انتقال - انتشار : ۱۹
- ۲-۴-۵-۲-۱ ضریب پخش طولی : ۲۱

- ۲۱ ۳-۴-۵-۲ معادله انتقال - انتشار برای آلاینده نا پایستار :
- ۲۲ ۴-۵-۴-۲ شرایط مرزی :
- ۲۳ ۵-۵-۴-۲ حل تحلیلی معادله انتقال - انتشار :
- ۲۴ ۱-۵-۵-۴-۲ حل تحلیلی معادله انتقال - انتشار با ضریب پخش طولی و سرعت ثابت :
- ۲۵ ۶-۵-۴-۲ حل عددی معادله انتقال - انتشار :
- ۲۷ - فصل سوم - مدل سازی عددی توزیع آلودگی در آبراهه ها**
- ۲۸ ۱-۳ مقدمه ای بر CFD
- ۲۸ ۲-۳ انواع روش های حل عددی :
- ۲۹ ۱-۲-۳ روش های اختلاف محدود :
- ۲۹ ۲-۲-۳ روش عناصر محدود :
- ۲۹ ۳-۲-۳ روش های طیفی :
- ۲۹ ۴-۲-۳ روش حجم محدود :
- ۳۰ ۱-۴-۲-۳ ویژگی های روش حجم محدود :
- ۳۳ ۳-۳ معادله کلی حاکم بر پدیده انتقال - انتشار :
- ۳۴ ۴-۳ حل عددی معادله حاکمه :
- ۳۸ ۵-۳ گسسته سازی زمانی :
- ۳۸ ۱-۵-۳ روش مرتبه اول اولر :
- ۳۹ ۱-۵-۳ شرط پایداری کورانت :
- ۳۹ ۲-۵-۳ روش Runge - Kutta :
- ۴۰ ۶-۳ گسسته سازی مکانی :
- ۴۰ ۱-۶-۳ Central Scheme :
- ۴۰ ۲-۶-۳ Upwind Scheme :
- ۴۰ ۳-۶-۳ Quick Scheme :
- ۴۱ ۷-۳ شرایط مرزی :

۴۲	.....	۳-۷-۱ شرط مرزی بالادست :
۴۲	.....	۳-۷-۲ شرط مرزی پایین دست :
۴۲	.....	۳-۷-۳ شرط مرزی دیواره :
۴۳	.....	۴-فصل چهارم - برنامه کامپیوتری به روش حجم محدود
۴۴	.....	۴-۱ مقدمه :
۴۵	.....	۴-۲ ویژگی های هندسی برنامه :
۴۶	.....	۴-۳ اطلاعات ورودی و خروجی :
۴۷	.....	۴-۴ طرح های عددی برنامه :
۴۸	.....	۴-۵ صحت سنجی برنامه :
۴۸	.....	۴-۵-۱ تست یک بعدی :
۵۱	.....	۴-۵-۲ تست دو بعدی :
۵۵	.....	۵-فصل پنجم - بررسی بازشدگی ناگهانی در نحوه توزیع آلودگی
۵۶	.....	۵-۱ مقدمه :
۵۷	.....	۵-۲ هدف پایان نامه :
۵۸	.....	۵-۳ شرایط هندسی بازشدگی :
۵۸	.....	۵-۴ شرایط هیدرولیکی بازشدگی :
۶۱	.....	۵-۵ شبکه بندی محاسباتی در حالات مختلف بازشدگی :
۶۳	.....	۵-۶ نتایج توزیع آلودگی در حالات مختلف بازشدگی :
۶۳	.....	۵-۶-۱ Case A ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل از بازشدگی :
۶۶	.....	۵-۶-۲ Case B ورود آلودگی از کنار ساحل سمت بازشدگی، قبل از بازشدگی :
۶۹	.....	۵-۶-۳ Case C ورود آلودگی در نقطه شروع بازشدگی :
۷۲	.....	۵-۶-۴ Case D ورود آلودگی در مرکز گردابه :
۷۶	.....	۵-۶-۵ Case E ورود آلودگی در نقطه ثابت :

۷۹.....	۵-۷ تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر توزیع آلودگی :
۸۳.....	۶- فصل ششم - نتیجه گیری
۱۴	۶-۱ مقدمه :
۱۴.....	۶-۲ نتیجه گیری :
۱۵.....	۶-۳ پیشنهادات برای پژوهش های بعدی :
۸۶.....	۷- پیوست ها
۱۷.....	۷-۱ پیوست ۱ :
۹۶.....	۷-۲ پیوست ۲ :
۱۰۳.....	۸- منابع و مراجع

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۲) اعداد نسبت داده شده به پارامتر نیترا ت ۱۳
- شکل (۲-۲) فرآیند های انتقال و انتشار ۱۸
- شکل (۳-۲) ۱۹
- شکل (۱-۳) شبکه های معمول در FVM - a - شبکه چهار ضلعی با ساختار b- شبکه سه ضلعی با ساختار c- شبکه مثلثی بی ساختار ۳۱
- شکل (۲-۳) انتخاب های معمول گره ها در FVM ۳۱
- شکل (۳-۳) نمایش حجم کنترل در نظر گرفته شده ۳۳
- شکل (۴-۳) شبکه بندی میدان در روش FVM ۳۵
- شکل (۵-۳) شرایط مرزی مختلف در معادله انتقال - انتشار ۴۱
- شکل (۱-۴) شبکه محاسباتی غیر یکنواخت در کانال با شرایط هندسی مختلف ۴۵
- شکل (۲-۴) مختصات نقاط ورودی ۴۷
- شکل (۳-۴) حل عددی و تحلیلی معادله انتقال محض در طرح های عددی و گام های زمانی مختلف ۴۹
- شکل (۴-۴) حل عددی و تحلیلی معادله انتقال - انتشار در طرح های عددی و گام های زمانی مختلف .. ۵۰
- شکل (۵-۴) نمونه هایی از نتایج حل تحلیلی و عددی در حالت دو بعدی ، با طرح های عددی متفاوت ۵۱
- ادامه شکل (۵-۴) ۵۲
- شکل (۱-۵) پلانی از مسیر رودخانه ۵۶
- شکل (۲-۵) شرایط هندسی کانال ۵۸
- شکل (۳-۵) نمودار سرعت در نسبت های مختلف باز شدگی (a) ۰/۵ (b) ۰/۴ (c) ۰/۳ ۶۰
- ادامه شکل (۳-۵) نمودار سرعت در نسبت های مختلف باز شدگی (d) ۰/۲ (e) ۰/۱ ۶۱
- شکل (۴-۵) شبکه محاسباتی در حالات مختلف باز شدگی ۶۲
- شکل (۵-۵) موقعیت ورود آلودگی Case A ۶۳
- شکل (۶-۵) توزیع آلودگی در حالت Case A ۶۴
- شکل (۷-۵) تاثیر نسبت باز شدگی ناگهانی کانال ، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵ ۶۵

- شکل (۵-۸) موقعیت ورود آلودگی Case B ۶۶
- شکل (۵-۹) توزیع آلودگی در حالت Case B ۶۷
- شکل (۵-۱۰) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال ، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵ ۶۸
- شکل (۵-۱۱) موقعیت ورود آلودگی Case C ۶۹
- شکل (۵-۱۲) توزیع آلودگی در حالت Case C ۷۰
- شکل (۵-۱۳) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال ، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵ ۷۱
- شکل (۵-۱۴) موقعیت ورود آلودگی Case D ۷۲
- شکل (۵-۱۵) توزیع آلودگی در حالت Case D ۷۳
- شکل (۵-۱۶) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال ، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵ ۷۴
- شکل (۵-۱۷) مقایسه دو حالت Case B و Case D در دبی ۰/۱۷۵ ۷۵
- شکل (۵-۱۸) موقعیت ورود آلودگی Case E ۷۶
- شکل (۵-۱۹) توزیع آلودگی در حالت Case E ۷۷
- شکل (۵-۲۰) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال ، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵ ۷۸
- شکل (۵-۲۱) توزیع آلودگی در حالت Case D در دبی ۰/۳۵ ۸۰
- شکل (۵-۲۳) مقایسه دو حالت Case B در دبی ۰/۱۷۵ و ۰/۳۵ ۸۱
- شکل (۵-۲۲) مقایسه دو حالت Case D در دبی ۰/۱۷۵ و ۰/۳۵ ۸۱

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) وزن پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص کیفی آب در روش NSF..... ۱۳
- جدول (۲-۲) سطح و شاخص کیفی جریان رودخانه‌ها بر اساس روش NSF..... ۱۴
- جدول (۳-۲) حدود کیفی مجاز جهت تخلیه پساب به محیط‌های پذیرنده (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) ... ۱۶
- جدول (۱-۴) طرح‌های عددی مختلف به کار رفته در برنامه ۴۸
- جدول (۲-۴) خطای نسبی در روش FTQS در تست دو بعدی ۵۳
- جدول (۱-۵) شرایط هیدرولیکی کانال ۵۹

۱- فصل اول - مقدمه

۱-۱ مقدمه :

رشد روز افزون جمعیت جهان، مصارف گوناگون آب را افزایش داده است. این امر نه تنها کمیت منابع آب در دسترس را کاهش داده و با محدودیتهای بیشتری روبه رو نموده است، بلکه به دلیل توسعه شهرنشینی و فعالیتهای صنعتی و کشاورزی، تغییر و تنزل کیفیت آبها را نیز به دنبال داشته است. به این دلیل بسیاری از کشورهای جهان با مشکل کمبود آب و یا آلودگی منابع آب مواجه شده اند و سالهاست در زمینه برنامه ریزی صحیح مدیریت منابع آب سرمایه گذاری می نمایند.

تأمین آب با رعایت استاندارد های تعریف شده برای مصارف گوناگون، همواره از مسائل مطرح در صنعت بوده است. استفاده از آب های سطحی برای تأمین آب مصرفی در کشاورزی، شرب، صنعت و... به عنوان اولین و در دسترس ترین راه تأمین آب بوده و جلوگیری از آلودگی این آب ها مانع ایجاد خسارات اقتصادی و انسانی خواهد بود. از طرفی دفع فاضلاب های صنعتی و شهری به گونه ای که کمترین زیان را وارد کرده و به توسعه پایدار صنعت لطمه ای وارد نیاورد، بسیار حائز اهمیت است. در بسیاری از موارد، استفاده از آب های سطحی روان جهت دفع فاضلاب کارخانجات (به خصوص برای کمیات آلوده کننده زوال یابنده) و یا به کارگیری در سیستم های خنک کننده (مانند نیروگاهها) به عنوان مناسب ترین روش تلقی می شود.

۲-۱ اهمیت بررسی نحوه توزیع آلودگی :

از آنجا که رودخانه ها همیشه پذیرنده فاضلاب ناشی از فعالیت انسانها، منابع خانگی و پساب صنایع و کشاورزی بوده اند. در بعضی مناطق جهان، تخلیه آلاینده های ناشی از فعالیت انسان در آب های جاری، کیفیت آب را به طور جدی مورد تهدید قرار داده است. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱) بر اساس اعلام سازمان حفاظت محیط زیست، پساب کارگاه های صنعتی از جمله عوامل آلوده کننده انواع منابع آب محسوب می شوند که عامل ایجاد آلودگی آب چاه ها، رودخانه ها و زمین های کشاورزی هستند و با توجه به تماس محصولات کشاورزی با مواد آلوده زای محلول در این پساب ها، امکان آلوده شدن این محصولات و انتقال آن به انسان به راحتی وجود دارد. (بجنوردی ۱۳۸۴)

میزان مقبولیت و کیفیت آب دریاچه ها، رودخانه ها و برکه ها، بر حسب نوع استفاده ای که از این منابع می شود، مشخص می گردد. برای فعالیت هایی نظیر ماهیگیری، شنا، قایقرانی و کشتیرانی، به آبی با کیفیت متفاوتی از مصارف شرب که واجد استانداردهای بسیار سختگیرانه است، نیاز می باشد. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

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. همچنین باید دانست که چگونه کیفیت آب بوسیله فاکتورهای طبیعی نظیر وضعیت عوارض زمین و شرایط آب و هوایی منطقه تحت تأثیر قرار می گیرد. بطور کلی هدف از مدیریت کیفیت آب حفاظت از یک منبع آب می باشد بطوریکه آب مورد نظر برای مصارفی که از قبل برای آن در نظر گرفته شده است، قابل استفاده باشد و بتوان از آن آب به عنوان یک فاکتور اقتصادی برای دفع مواد زائد در شرایط اضطراری نیز استفاده کرد و ظرفیت اختلاط و تحمل این مواد را نیز داشته باشد. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

اداره حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA) بر آورد کرده که تقریباً یک سوم جریان آب جهان به طور مشخص آلوده و اصل حفظ کیفیت آب بر هم زده شده است. در این برآورد آلودگی زبانی که بر خواص شیمیایی و فیزیکی آب لطمه وارد می کند، تعریف شده است. (دبیری ۱۳۷۹)

به این ترتیب پیش بینی میزان آلودگی توزیع شده در رودخانه در اثر ورود آلودگی در نقاط مختلف محیط و با گذشت زمان امری حیاتی بوده و برای تعیین شرایط و استانداردهای خاص برای تخلیه پساب کارخانجات و یا هر نوع آلودگی دیگر به رودخانه ها ضروری است چرا که در صورت افزایش میزان آلودگی به صورتی که از ظرفیت خود پالایی رودخانه بیشتر شود، اکوسیستم رودخانه به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و رشد و نمو آبزیان، گیاهان و ماهیان و سایر اجزای اکوسیستم دچار اختلال می گردد. (نیری ۱۳۷۸)

۳-۱ هدف پایان نامه :

چنانچه بتوان در مسیر رودخانه ها اختلاط ایجاد کرد، توان خودپالایی آن ها افزایش می یابد. برای ایجاد اختلاط بهتر، می توان در مسیر کانال بازشدگی ناگهانی ایجاد نمود. بازشدگی ناگهانی سبب ایجاد گردابه هایی در محل می شود که مانند یک همزن طبیعی عمل کرده و پخش مواد آلاینده را بهبود می بخشد.

برای طراحی یک بازشدگی باید ضوابطی را برای پارامترهای طراحی از قبیل نسبت عرض اضافه شده به عرض اولیه و محل ورود آلاینده به دست آورد. ضمناً میزان تأثیر هر ترکیب بازشدگی و محل آلاینده بر بهبود پخش آلاینده واجد اهمیت است. تغییر شرایط هیدرولیکی (تغییر دبی، تغییر سرعت و...) و تأثیر آنها بر فرآیند پخش نیز باید معلوم شود. این پایان نامه به بررسی این شرایط برای حصول بهترین نتیجه از ایجاد بازشدگی ناگهانی اختصاص دارد.

فصل اول این پایان نامه به مقدمات، معرفی، و ترتیب فصول آن می پردازد.

در فصل دوم توزیع آلودگی در آبراهه ها بررسی خواهد شد. در این فصل مطالبی پیرامون انواع طبقه بندی های آلودگی و روش های مختلف توزیع آلودگی آمده است. در فصل سوم ضمن بیان تاریخچه روش های مختلف عددی، روش حجم محدود معرفی شده و در نهایت فرمولاسیون عددی این روش برای مدل سازی توزیع آلودگی در آبراهه ها بیان می گردد، همچنین روابط ریاضی آن ها در شرایط مختلف هندسی و مرزی بررسی می شود. در فصل چهارم به برنامه کامپیوتری که برای توزیع آلودگی در آبراهه ها بر اساس روش حجم محدود نوشته شده است، پرداخته می شود. در ادامه این فصل ویژگی های مختلف این برنامه که با زبان های برنامه نویسی Matlab و Fortran نوشته شده است بیان خواهد شد. همچنین صحت نتایج مدل به وسیله تست های یک بعدی و دو بعدی حل های مختلف تحلیلی سنجیده خواهد شد. در فصل پنجم به مطالعات مربوط به هدف پایان نامه پرداخته می شود. تأثیر بازشدگی بر توزیع آلودگی و همچنین تأثیر نقطه ورود آلودگی و تغییرات سرعت جریان از جمله مواردی است که در این فصل به آن ها پرداخته خواهد شد. فصل ششم نیز شامل نتایج بدست آمده، راه کارها و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده است.

۲- فصل دوم - توزیع آلودگی در آبراهه ها

۱-۲ تعریف آلودگی^۱:

آلودگی عبارت است از اضافه شدن هر نوع ماده یا انرژی به محیط زیست به نحوی که سبب به خطر افتادن زندگی یا سلامت جانداران، اعم از انسان، حیوان، یا گیاهان شود. به عبارت دیگر ورود عواملی به محیط که باعث ناپایداری، اختلال، آسیب و یا ناراحتی در آن محیط برای موجودات زنده شوند را آلودگی می گویند.

باید به این نکته توجه نمود که مواد آلوده کننده ای که در پی رویدادهای طبیعی پدید می آیند، زمانی به عنوان آلاینده شناخته می شوند که میزان آنها از حد طبیعی بگذرد. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

مهمترین نوع آلودگی محیط زیست که بشر امروزه با آن دست به گریبان است آلودگی آب است. آلودگی آب به تغییر و تحولات کیفی آب، ناشی از فعالیت های مستقر در مجاورت منابع (حوضه آبریز) اطلاق می شود. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰) به عبارت دیگر آب آلوده، به معنی حالتی از آب است که در آن ماده ای با غلظت کافی برای تغییر کیفی منجر به کاهش کیفیت تا پایین تر از استانداردهای لازم، وجود داشته باشد. (دبیری ۱۳۷۹)

برخی از این آلودگی ها زوال پذیرند و می توان آنها را تغییر داد همانند مواد آلی موجود در فاضلاب های بهداشتی. اما برخی از آلاینده ها همانند فلزات سنگین ناشی از فاضلاب های صنعتی از بین نمی روند؛ لذا باید اقدامات اساسی در خصوص پیشگیری از ورود این نوع آلاینده ها به منابع آبی صورت پذیرد.

۲-۲ انواع روش های ورود آلاینده ها:

به طور کلی آب های سطحی و زیر زمینی مسیری مهم برای انتقال آلاینده ها به محیط زیست و انسان می باشد. (عطائی آشتیانی، حسین آبادی ۱۳۸۵) ورود آلاینده ها به رودخانه ها به دو صورت است:

- انتشار لحظه ای^۲ آلاینده که ماده آلوده کننده به طور لحظه ای وارد جریان می شود؛ مانند انتشار سریع و اختلاط حجم قابل توجهی از استون در یک رودخانه.
- انتشار مرحله ای^۱ یا پیوسته^۲ یک آلاینده به جریان، در این حالت آلودگی می تواند در بازه ای از زمان وارد رودخانه شود (پیوسته مدت دار) و یا در طول زمان ادامه داشته باشد. (کرمی، غواصیه ۱۳۸۸) مانند اختلاط پیوسته.

¹ Pollution

² Instantaneous Release

۲-۳ طبقه بندی انواع آلودگی ها:

همه ساله تعداد وسیعی از آلاینده ها به آب های سطحی تخلیه می شوند که به صورت منابع نقطه ای^۱ (کانون متمرکز) و منابع غیر نقطه ای^۲ (کانون نامتمرکز) طبقه بندی می گردند. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

آلودگی آب با منابع نقطه ای، ناشی از فعالیت هایی است که آلودگی از منابع مشخص و معین به طرق مختلف و به طور دائم وارد سیستم آبی می شوند؛ نظیر مجرای خروجی یک فاضلاب. این منابع قابل تشخیص و محدود می باشند به عبارت دیگر منبع ورودی قابل مشاهده و معینی دارند. انواع فاضلاب های خانگی، صنعتی، شیرابه ناشی از دفن مواد زائد جامد و آلاینده های نفتی از جمله منابع آلاینده نقطه ای به شمار می روند. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰) زیرا از طریق یک شبکه (بوسیله لوله یا کانال) جمع آوری و از یک نقطه به آب پذیرنده تخلیه می گردند. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

به طور کلی آلودگی های غیر نقطه ای با کانون نامتمرکز نوعی از آلودگی هستند که می توانند در یک منطقه وسیع به صورت پراکنده در بعضی اوقات سال وارد محیط های آبی شوند. این نوع آلودگی ها ناشی از طیف وسیعی از فعالیت های انسانی می باشد که در آن آلاینده ها، منبع ورودی قابل مشاهده و معینی ندارند، از این رو منابع آلاینده با کانون نامتمرکز، به نام آلاینده با منابع غیر معین نیز خوانده می شوند. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰) به طور کلی مهمترین منبع آلودگی غیر نقطه ای رواناب های شهری و کشاورزی هستند که از طریق مجموعه ای از نقاط به آب های پذیرنده تخلیه می شوند (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱) در این حالت آب های سطحی یا در سطح زمین جاری هستند و یا از طریق کانال های زهکشی به نزدیکترین منبع آب (جریان رودخانه) هدایت می شوند.

۲-۳-۱ طبقه بندی آلودگی ها از نظر منبع تولید:

انواع مختلفی از آلودگی ها از نظر منبع تولید عبارتند از: (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

- آلودگی ناشی از فاضلاب های شهری و روستایی
- آلودگی آب ناشی از مواد زائد جامد
- آلودگی آب ناشی از فاضلاب های صنعتی
- آلودگی آب ناشی از مواد نفتی و هیدروکربورها

¹ Step Input of a pollution

² Continuous Release

³ Point Sources

⁴ Non Point Sources

- آلودگی ناشی از فاضلاب کشاورزی

۲-۳-۲ طبقه بندی آلودگی ها از نظر کیفیت :

آلوده کننده های آب از نظر کیفیت آب به موارد زیر تقسیم بندی می شوند : (دبیری ۱۳۷۹)

- زباله های اکسیژن خواه
- عوامل بیماری زا
- مواد غذایی گیاهی
- ترکیبات آلی سنتز شده (مصنوعی)
- نفت
- مواد شیمیایی معدنی و کانی ها
- رسوبات
- مواد رادیواکتیو
- گرما

در ادامه برخی از موارد فوق به اختصار بیان می شوند :

مواد اکسیژن خواه، باعث مصرف و کاهش اکسیژن محلول آب می شوند. صنایع غذایی و کاغذ سازی از جمله صنایعی هستند که تولید مواد زائد اکسیژن خواه می کنند. (کی نژاد و ابراهیمی)

مواد زائد اکسیژن خواه از آلاینده های متداولی هستند که اثرات شدیدی بر روی اغلب رودخانه ها داشته و از اهمیت خاصی برخوردارند. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

متداولترین روش برای اندازه گیری مقدار مواد آلی اکسیژن خواه، آزمایش اکسیژن مورد نیاز بیو شیمیایی، BOD^۱ است. در این آزمایش فرض بر این است که همه مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی موجود در نمونه آب بوسیله میکروارگانیسم ها و با مصرف اکسیژن به CO₂ و آب تبدیل می شوند.

BOD یک آزمایش زیست آزمونی^۲ است که در آن میکروارگانیسم ها در شرایطی مشابه با وضعیت طبیعی موجود در آب برای اندازه گیری غیر مستقیم مقدار مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی موجود استفاده می شوند. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

¹ Biochemical Oxygen Demand

² Bioassay

مواد مغذی یا نوترنیتها- که مهمترین آن ها نیتروژن و فسفر می باشد - از جمله مواد مورد نیاز موجودات زنده می باشند. اما وقتی میزان نوترنیتها بیش از حد شود منتهی به رشد جلبک ها شده و با از بین رفتن جلبک ها و ته نشینی آنها در کف بستر، مواد اکسیژن خواه آزاد می شود. (ناصری و قانعیان ۱۳۸۱)

فلزات و ترکیبات شیمیایی آلی سمی که در رواناب های کشاورزی - به دلیل استفاده از آفت کش ها و علف کش ها - 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 آلاینده ها در آب رودخانه ها می تواند برای اکوسیستم های طبیعی و بعضی مصارف انسانی نامناسب باشد. (طهماسبی بیرگانی و محسنی ۱۳۸۸)

از جمله فلزات سنگین می توان سرب را نام برد، سرب از نظر انتشار گسترده ترین عنصر سنگین و سمی در محیط زیست است به طوری که می توان اثر آن را از یخ های قطبی تا رسوبات اعماق زمین دید. (حقیقی و عربی ۱۳۸۸) سطوح ۳۰ میکروگرم در دسی لیتر سرب باعث اختلالات عصبی و بین ۳۰ تا ۱۰۰ میکروگرم در دسی لیتر سرب باعث مشکلات شدید در سیستم عصبی، آسیب کلیه ها، ناتوانی جنسی و کم خونی است، همچنین مسمومیت سرب در ماهیان با آسیب اپیتلیوم آبششی مشخص شده است. (Abernathy , Larson 1984)

تخلیه انواع نمک ها از طریق صنایع یا نمک های استفاده شده در جاده ها به رودخانه ها، افزایش غلظت نمک ها در رودخانه ها 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 خسارت به محصولات کشاورزی یا مسمومیت خاک شود.

رسوبات یکی از انواع آلودگی هاست که به طور طبیعی در فرآیند های فرسایشی به وجود می آیند. رسوبات در اثر این فرآیند ها موجب آلودگی گسترده آب های سطحی می گردند. ورود جامدات معلق در این حالت، حداقل ۷۰۰ برابر مقداری است که توسط فاضلاب وارد آب های طبیعی می شود. تأثیر انسان بر سرعت فرسایش و همچنین اثر دراز مدت رسوبات از جمله مسائلی است که باید به دقت بررسی شود. سرعت فرسایش توسط کشاورزی به میزان ۴ تا ۹ برابر و توسط عملیات ساختمانی ۱۰۰ برابر افزایش می یابد. عملیات تخلیه معادن به میزان زیادی بر روی فرسایش در یک منطقه تأثیر می گذارد. رسوبات حاصل از معادن چندین برابر بیشتر از رسوبات کشاورزی است. (دبیری ۱۳۷۹)

گرما معمولاً از نظر بیشتر مردم، یک آلوده کننده و حداقل به عنوان یک عامل فاسد کننده شیمیایی نیست. گرچه افزایش دمای آب بدن سبب تأثیرات زیان باری به بزرگی بسیاری از آلوده کننده های شیمیایی می شود. این شکل جدی آلوده کننده حرارتی، ابتدا از عملکرد آب های مورد استفاده به عنوان سرد کننده در بسیاری از فرآیندهای صنعتی چشمه می گیرد. بیشتر آب های مورد استفاده برای این هدف با گرمای افزوده شده به منبع اصلی باز می گردند. (دبیری ۱۳۷۹)

از سال ۱۹۸۰ تقریباً ۲۰ درصد همه آب های تازه جاری در ایالات متحده آمریکا برای هدف سرد کنندگی به کار گرفته شده است. غالباً آب سرد کننده مورد استفاده دارای دمای ۱۲ درجه سانتیگراد بالاتر از دمای رودخانه یا جویباری است که به آن باز می گردند. (دبیری ۱۳۷۹)

اکنون که انواع طبقه بندی آلودگی از لحاظ زیست محیطی مطرح شد بهتر است طبقه بندی هیدرولیکی آلودگی مطرح شود:

۳-۳-۲ طبقه بندی هیدرولیکی آلودگی:

مسائل پراکندگی^۱ آلودگی که چگالی آلاینده ها مشابه چگالی سیال (آب) درون آبراهه اصلی (سیال دریافت کننده) می باشد. در این صورت آلاینده ها به صورت معلق درون آب خواهند بود. مانند آلودگی های رسوبی ناشی از فرسایش، آلودگی های ناشی از پخش فلزات سنگین، آلودگی ناشی از پخش مواد شیمیایی و سمی و بسیاری دیگر از انواع آلودگی های رایج در این دسته قرار می گیرند. مطالعه اخیر بر روی همین نوع آلودگی خواهد بود. در ادامه به طور مفصل به این موضوع پرداخته و روابط ریاضی توزیع این نوع آلودگی بدست خواهد آمد. (مشعل ۱۳۸۶)

۴-۲ نحوه توزیع آلودگی:

آب های سطحی همیشه به عنوان تخلیه گاه اصلی پساب و فاضلاب ناشی از فعالیت های کشاورزی، صنعتی و شهری بوده اند. این امر، کیفیت این منابع آبی را برای مصارف انسانی تحت تأثیر قرار داده است. یکی از مسائل مهم که در سال های اخیر توجه محققین را جلب کرده است، مکانیزم انتقال و انتشار آلودگی در آب های سطحی است؛ و جز در برخی از موارد مطالعات دقیقی بر روی این پدیده صورت نگرفته است. در چند دهه اخیر روش های مختلفی بر اساس مشاهدات میدانی، مدل های

^۱ Dispersion

آزمایشگاهی، روش های تحلیلی و مجموعه وسیعی از مدل های عددی، در جهت توصیف و پیش بینی حرکت آلودگی در آب های سطحی توسعه یافته اند. (انصاری پور، ابراهیمی ۱۳۹۰)

در این مطالعه ابتدا مدل های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، سپس روش های تقریبی که اساس کار آن ها روش های آماری است مرور خواهد شد. در نهایت روش های ریاضی که شامل روش های تحلیلی و عددی هستند، بیان می گردد.

۱-۴-۲ آزمایش های کیفیت آب :

ترکیب شیمیایی آب، H_2O ، فرمول شیمیایی کاملاً شناخته شده است. آب می تواند به حالت های جامد، مایع و گاز وجود داشته باشد. اگر چه در اینجا در مورد نوع مایع آن بحث می شود. آزمایش های اصلی کیفیت آب رودخانه ها، دریاچه ها، سواحل و آب های نزدیک ساحل به صورت معمول در یکی از سه گروه عمده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار می گیرند. در ادامه موارد فوق بررسی می شود.

۱-۱-۴-۲ آزمایش های فیزیکی :

آزمایش های به کار گرفته شده جهت بررسی و تعیین خواص فیزیکی آب را می توان شامل موارد زیر دانست :

- هدایت مخصوص
- باقیمانده غیر قابل صاف کردن I
- باقیمانده کل جامد ها و کل مواد قابل صاف شدن II
- مواد قابل ته نشین شدن بر حسب وزن

۲-۱-۴-۲ آزمایش های شیمیایی :

آزمایش های شیمیایی خود به سه دسته تعیین فلزات، تعیین مواد معدنی و غیر فلزی و تعیین مواد آلی قابل تقسیم بندی می باشد.

۳-۱-۴-۲ آزمایش های میکرو بیولوژیکی :

آزمایش های باکتریائی آب برای تعیین میزان آلودگی، پتانسیل بیماری زائی یا درجه آلودگی انجام می گیرد. دو گروه عمده از ارگانیسم ها به عنوان شاخص های آلودگی به کار می روند. مجموع کلیفرم ها و کلیفرم های مدفوعی، هر دوی این ها به عنوان شاخص در فاضلاب به کار می روند. اما در اکثر آزمایشگاه ها، گروه کلیفرم مدفوعی معنی دارتر قلمداد می گردد.

برای بحث بیشتر در مورد آزمایش های کیفیت آب به مراجع (ترا بیان و هاشمی ۱۳۸۱؛ خانی و شریفی پور ۱۳۸۲) مراجعه شود.

۲-۴-۲ آنالیز کیفی رودخانه:

به طور کلی کیفیت منابع آب تحت تأثیر پارامتر های بسیاری قرار دارد که شناسایی نوع و میزان تأثیر هر یک از آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین منظور شاخص کیفی آب بر اساس نگرش مبتنی بر کیفیت آب تدوین شده است تا بتوان پارامتر های متعدد تأثیر گذار بر کیفیت آب را به صورت واحد و در قالب یک عدد کلی بیان نمود. 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.

یکی از این شاخص ها، شاخص کیفی آب بنیاد ملی علوم آمریکا یا به طور اختصار NSF است که در حال حاضر به منظور پایش روند تغییرات کیفیت آب رودخانه هایی که تنها در مجاورت زمین های کشاورزی قرار دارند، توسط سازمان های اجرائی آمریکا مورد استفاده قرار می گیرد. پارامتر های مورد استفاده در تعیین شاخص کیفی آب در روش NSF عبارتند از: اکسیژن محلول، کلیفرم مدفوعی، PH، BOD₅، تغییرات دما، فسفات، نترات، میزان کدر بودن و میزان جامدات محلول در آب.

برای هر یک از پارامتر های کیفی مذکور با توجه به اهمیتی که برای آنها در شاخص در نظر گرفته اند وزن و ضریب خاصی مطابق با جدول (۱-۲) می باشد. بدیهی است که هر چه وزن در نظر گرفته شده بالاتر باشد، تأثیر پارامتر های مربوط در نتیجه نهایی شاخص بیشتر می باشد. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

جدول (۱-۲) وزن پارامترهای تأثیر گذار بر شاخص کیفی آب در روش NSF

وزن (ضریب)	پارامتر
۰/۱۷	اکسیژن محلول
۰/۱۶	کلیرم مدفوعی
۰/۱۱	PH
۰/۱۱	BOD ₅
۰/۱۰	تغییرات دما
۰/۱۰	فسفات کل
۰/۱۰	نیتрат
۰/۰۸	میزان کدري
۰/۰۷	مجموع جامدات

در شاخص کیفیت آب NSF بر مبنای مطالعاتی که انجام گرفته است، برای هر یک از پارامترهای کیفی بیان شده، با توجه به غلظت آن ها عددی با Q-Value بین صفر تا صد نسبت داده می شود. رابطه بین غلظت پارامتر و عدد نسبت داده شده به آن بر اساس نمودارهای تجربی که حاصل آن ها نظر جمعی از متخصصین مربوطه می باشد، تعیین می گردد. در زیر یک نمونه از این نمودارهای تجربی را در شکل (۱-۲) ملاحظه می کنید :



شکل (۱-۲) اعداد نسبت داده شده به پارامتر نیترات

اعداد نسبت داده شده به هر پارامتر در وزن پارامتر ضرب و با یکدیگر جمع می گردند. عدد حاصل که در مقیاس ۱۰۰ می باشد، برای بررسی و اعلام شرایط کیفی آب رودخانه با مقادیر مندرج در جدول (۲-۲) مقایسه و وضعیت کیفی رودخانه تعیین می گردد.

بر این اساس منابع آب در محدوده عالی یا خوب جهت ادامه حیات موجودات آبی و سایر فعالیت های زیستی مرتبط با آب مناسب هستند. آب های با درجه متوسط برای زندگی آبیان مناسبند ولی رشد جلبک ها در آنها بسیار بالاست. منابع آب با کیفیت بد دارای آلودگی است و تنها برخی از آبیان در آن زنده می مانند و در آب خیلی بد موجودات آبی محدودی توان حیات دارند.

جدول (۲-۲) سطح و شاخص کیفی جریان رودخانه ها بر اساس روش NSF

کیفیت	شاخص کیفی آب
خیلی خوب (Excellent)	۹۰-۱۰۰
خوب (Good)	۷۰-۹۰
متوسط (Medium)	۵۰-۷۰
بد (Bad)	۲۵-۵۰
خیلی بد (Very Bad)	۰-۲۵

مجموع ضرایب ۹ گانه وزن دهی یک است. اگر پارامتری اندازه گیری نشود و یا داده اندازه گیری شده ناقص باشد، پارامتر مذکور از محاسبات حذف و مجموع عددی شاخص بر مجموع ضرایب وزن دهی پارامتر های مورد استفاده تقسیم می گردد و بر این اساس قضاوت نهایی راجع به کیفیت آب رودخانه به عمل می آید. به عنوان مثال در زمانی که داده اندازه گیری پارامتر میزان کدری (با وزن ۰/۰۸) ناقص باشد، مقدار عددی شاخص با استفاده از ۸ پارامتر دیگر محاسبه و نتیجه نهایی بر ۰/۹۲ تقسیم و مقدار شاخص تعیین و قضاوت نهایی راجع به کیفیت آب رودخانه بر این اساس به عمل می آید، باید این نکته را نیز یاد آور شد که پارامتر اختلاف دما بین ایستگاه بالادست و پایین دست اندازه گیری و محاسبه می شود، لذا امکان محاسبه پارامتر تغییر دما برای ایستگاه بالادست سرشاخه وجود ندارد. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

۲-۴-۳ استاندارد کیفیت و حدود مجاز کیفی پساب:

با توجه به اهمیت بررسی و اعمال کنترل بر روی فاضلاب (یا پساب) خروجی واحد های صنعتی به منظور حفاظت از محیط زیست و منابع آبی پذیرنده، در کشور های مختلف استاندارد ها 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 (۲-۳) جهت آشنایی به نمونه هایی از آن ها اشاره می شود.

از جنبه های مثبت استاندارد های یاد شده این است که حدود مجاز پارامتر های 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. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

جدول (۲-۳) حدود کیفی مجاز جهت تخلیه پساب به محیط های پذیرنده (بر حسب میلیگرم بر لیتر)

تخلیه به آب های زیر زمینی	جهت مصارف کشاورزی و آبیاری	تخلیه به آب های سطحی	مواد آلوده کننده
-	۲	۲	اکسیژن محلول
-	-	-	هدایت الکتریکی
۵-۹	۶-۸/۵	۶/۵-۸/۵	PH
۱	۰/۲	۱	مس
۱۰	-	۵۰	نیترات
۱۰	-	۳	نیتريت
۵	۵	۵	آلومینیوم
۱	-	۲/۵	نیتروژن آلی
۶	-	۶	فسفات
۲	۲	۲	روی
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	کلیفرم کلی
۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	کلیفرم مدفوعی
۳	۳	۳	سولفید
۰/۱	۰/۱	۰/۱	آرسنیک
۰/۱	۰/۱	۰/۵	سیانید
۰/۱	۰/۱	۰/۱	وانادیوم
۱۰	۱۰	۱۰	روغن گریس
صفر	صفر	صفر	مواد رادیواکتیو
۲	۲	۲/۵	فلوراید
۱	۱	۱	سرب

البته استاندارد ها و جداول سنجش کیفی آب دیگری نیز در سایر مراجع وجود دارد که برای مثال می توان به مراجع (خانی و شریفی پور ۱۳۸۲؛ مهاجر، امینی ۱۳۹۰) اشاره کرد.

۲-۴-۴ روش های تقریبی :

اساس کار این روش ها، روش های آماری است به این ترتیب که به کمک روش های آزمایشگاهی، غلظت آلودگی در چند نقطه از ناحیه مورد مطالعه تعیین می گردد سپس به کمک منحنی توزیع نرمال و سایر روش های آماری اقدام به تقریب زنی آلودگی در نقطه مورد نظر می شود. برای بحث مفصل به مرجع (مخبری ۱۳۷۷) مراجعه شود.

اشاره به این نکته ضروری است که روش های تقریبی معمولاً دقیق نیستند و روش های آزمایشگاهی هم عموماً پرهزینه هستند. برای تعیین توزیع آلودگی در رودخانه ها، روش های ریاضی - که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند - نسبت به سایر روش ها مناسبترند، اما این روش های آزمایشگاهی معمولاً به عنوان روشی برای صحت سنجی روش های ریاضی (روش های عددی ریاضی) مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۴-۵ روش های ریاضی :

مسائل آلودگی های محیطی، در رودخانه ها، سواحل و هوا را می توان با استفاده از مدل های ریاضی نیز تحلیل کرد. در این نوع مسائل، مجهول C غلظت ماده آلوده کننده به عنوان یک کمیت عددی فیزیکی است که همان غلظت آلاینده است که می تواند شوری و یا درجه حرارت آب و غیره باشد.

در حل مسائل مربوط به آلودگی، این موضوع باید مشخص شود که کمیت ماده آلوده کننده پایستار است یا خیر. در صورتی که ماده آلوده کننده ناپایستار باشد، ماده آلوده کننده در اثر فرآیند های بیولوژیکی و یا شیمیایی از بین می رود (و یا تکثیر می شود) و در حالت خاص این پدیده می تواند بدون جابه جایی و انتشار رخ دهد.

از کمیت های ناپایستار می توان از تعداد باکتری ها در واحد حجم آب نام برد، که در شرایط خاص، به صورت تابع نمایی^۱ نسبت به زمان تغییر می کند. (افزایش و یا کاهش می یابد) (شمسی ۱۳۷۹) علاوه بر این باید مشخص شود که چگالی ماده آلاینده با چگالی ماده پذیرنده، یکسان است یا خیر.

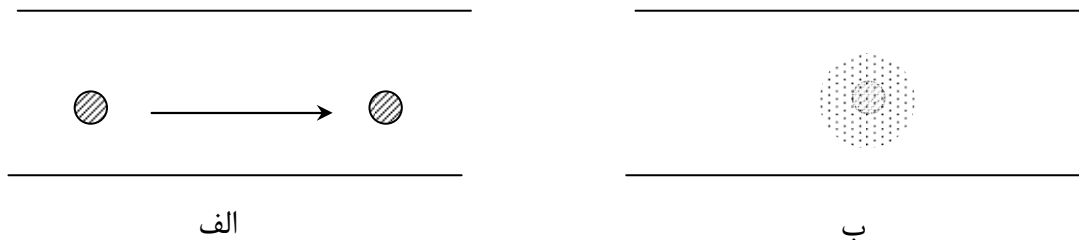
بنابراین با توجه به پایداری، چگالی و نوع ماده آلاینده (نقطه ای - غیر نقطه ای، لحظه ای - پیوسته) حالت های مختلف و متنوعی وجود خواهد داشت که در ادامه به برخی از این حالات اشاره خواهد شد.

^۱ Exponential Decay

۲-۴-۵-۱ آلودگی با چگالی یکسان آلاینده و محیط پذیرنده :

یک جسم سیال (سیال دریافت کننده) را در نظر بگیرید که حجم کوچکی از یک سیال ثانوی « ردیاب » به درون آن تزریق می شود. فرض می شود که چگالی سیال ردیاب با چگالی سیال دریافت کننده برابر باشد، بنابراین به طور خنثی شناور است. حتی اگر سیال دریافت کننده 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 است در محیطی به قطر یک متر پخش شود. اگر بدنه سیال دریافت کننده در حال جریان باشد و عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ باشد (جریان متلاطم)، مکانیسم قدرتمندی را برای انتشار ردیاب وجود خواهد داشت. اگر ماده رنگی در نقطه ای به جریان متلاطم تزریق شود. این ماده تحت دو فرآیند مشخص قرار خواهد گرفت :

- ماده رنگی با سرعتی قابل قیاس با سرعت جریان انتقال می یابد. (انتقال افقی یا Advection) شکل (۲-۲-الف)
- ماده رنگی بر اثر تلاطم جریان مخلوط خواهد شد (انتشار یا Diffusion) بنابراین کره تأثیر آن بزرگتر و بالطبع ردیاب رقیق تر خواهد شد. شکل (۲-۲-ب)

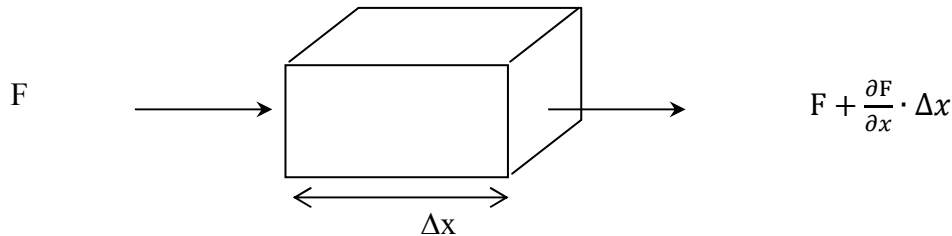


شکل (۲-۲) فرآیندهای انتقال و انتشار

انتشار ناشی از تلاطم بیشتر از انتشار مولکولی است و از ترکیب حالات انتقال و انتشار، پراکندگی ایجاد می شود. (مشعل ۱۳۸۶)

۲-۴-۵-۲ مدل ریاضی پدیده انتقال - انتشار :

اصل بقاء جرم در مورد یک کمیت پایدار که در آب محلول^۱ و یا به صورت معلق^۲ است برای یک حجم محدود به طول Δx و مساحت واحد عمود بر جهت جریان به صورت معادله زیر بیان می شود. (سیال ساکن است) (شکل ۲-۳). (شمسی ۱۳۷۹)



شکل (۲-۳)

$$\frac{\partial C}{\partial t} \cdot \Delta x + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \Delta x = 0 \quad (1-2)$$

C غلظت ماده مورد نظر و F شار جرمی در جریان است که بواسطه انتشار مولکولی^۳ جابه جا شده 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^۴ به صورت زیر است : (شمسی ۱۳۷۹؛ محمدی ۱۳۸۱)

$$F = -D_m \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-2)$$

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 می باشد. در رابطه فوق F ، شار جرمی

($\frac{\text{جرم}}{\text{مساحت} \times \text{زمان}}$)، C غلظت ماده در محلول ($\frac{\text{جرم}}{\text{حجم}}$) و D_m ضریب پخش مولکولی است. ($\frac{\text{مساحت}}{\text{زمان}}$)

علامت منفی دلیل بر آن است که ماده از قسمت با غلظت زیاد به قسمت با غلظت کم جاری می شود. (محمدی ۱۳۸۱)

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

¹ Diluted

² Suspended

³ Molecular Diffusion

⁴ 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 :

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

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

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. (Tannehill , Anderson 1979)

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

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] \quad (8-2)$$

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.

¹ Advection Flux

² Diffusion Flux

۲-۴-۵-۱ ضریب پخش طولی :

تخمین دقیق ضریب پخش طولی در رودخانه ها به لحاظ مسائل مهندسی رودخانه، محیط زیست، طراحی آبگیر ها و دلتاها و ارزیابی خطر تزریق آلاینده های خطرناک به درون رودخانه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بنابراین بررسی دقیق تغییرات غلظت آلاینده ها در رودخانه های طبیعی با استفاده از مدل های یک بعدی انتقال- انتشار نیازمند انتخاب ضریب پخش طولی مناسب است. به علت پیچیده بودن فرآیند پخش آلودگی و جریان در رودخانه های طبیعی، محاسبه دقیق این ضریب بسیار مشکل است و اغلب با استفاده از روابط تجربی تعیین می شود که استفاده از این روابط در برخی شرایط با نتایج خوبی همراه بوده ولی تعمیم آنها برای کلیه شرایط هندسی و هیدرولیکی دشوار می باشد. از میان پارامتر های مؤثر در برآورد ضریب پخش طولی می توان به عمق متوسط جریان (H)، عرض متوسط سطح آب (W)، سرعت جریان (U) و سرعت متوسط برشی (U^*) اشاره کرد. چند مورد از این روابط تجربی در زیر آمده است : (تراپیان و هاشمی ۱۳۸۱؛ انصاری پور، ابراهیمی ۱۳۹۰؛ Fisher, List 1979; Kashefipour and Falconer 2002)

$$D = 5.93H \cdot U^* \quad \text{رابطه الدر} \quad (۹-۲)$$

$$D = 7.25 HU \cdot \frac{U}{U^*} \quad \text{رابطه تکستون} \quad (۱۰-۲)$$

$$D = 0.011 \frac{U^2 W^2}{HU} \quad \text{رابطه فیشر} \quad (۱۱-۲)$$

$$D = 10.612 HU \cdot \frac{U}{U^*} \quad \text{رابطه کاشفی پور و فالکونر} \quad (۱۲-۲)$$

۲-۴-۵-۳ معادله انتقال - انتشار برای آلاینده ناپایستار :

در حالتی که ماده آلاینده ناپایستار باشد، جمله چاه یا مصرف باید به معادله بقاء جرم افزوده شود. در اغلب حالات نرخ استهلاک ماده به صورت نمایی است. این استهلاک بواسطه فرآیندهای بیولوژیکی و غیره به صورت $C=C_0 e^{-kt}$ بیان می شود. در این حالت معادله انتقال - انتشار (معادله (۲-۶)) به شکل زیر در خواهد آمد : (شمسی ۱۳۷۹؛ محمدی ۱۳۸۱)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm (D_k \cdot C) \quad (۱۳-۲)$$

که در آن $(D_k C)$ جمله حاصل برای اولین مرحله واکنش می باشد و بیان می کند که نرخ افزایش (+) یا کاهش (-) فعالیت ماده رخ می دهد. D_k یک ضریب - یا ثابت - واکنش ماده در مخلوط است که با واحد $(\frac{1}{T})$ مشخص می شود.

ضریب زوال^۱ به خواص ماده آلاینده و به حرارت بستگی دارد. مقدار های این ضریب برای نرخ کاهش ترکیب نشده یا پوسیده) به این ترتیب مشخص می شود: (Metcalf and Eddy 1972)

$$0.05 < D_k(\text{day}^{-1}) < 0.30(2.0) \quad (14-2)$$

روابط ساده زیر برای تعیین مقدار D_k وجود دارد.

$$D_k = -0.164 \times P.H + 1.4934 \quad (15-2)$$

$$D_k = -0.00023 \times E.C + 0.581 \quad (16-2)$$

$$D_k = 0.160 \times P.H - 0.000402 \times E.C - 0.401 \quad (17-2)$$

در روابط فوق $P.H$ میزان اسیدیته آب و $E.C$ میزان هدایت هیدرولیکی آب بر حسب میکروموس بر سانتیمتر می باشد. (حقیقی و عربی ۱۳۸۸)

با مدل سازی جریان در محدوده ای کوچک از مسیر که ورودی ها و خروجی ها در آن قابل کنترل هستند و با ورود آلاینده در ابتدای این محدوده و مقایسه نتایج خروجی از مدل و نتایج آزمایشگاهی و اعمال اثرات ناشی از اسیدیته و میزان مواد معلق در آن بر روی زوال آلاینده، می توان به رنج قابل قبولی از این ضریب دست یافت.

۲-۴-۵-۴ شرایط مرزی:

برای آن که 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 قرار زیر است. (شمسی ۱۳۷۹)

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

¹ Decay Coefficient

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (18-2)$$

• مرز جذب کننده: در این صورت اگر جذب کامل باشد، مقدار غلظت در مرز صفر است یعنی:

$$C=0$$

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

۲-۴-۵-۵ 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 همچنین پیچیدگی شرایط مرزی و اولیه است. البته روش های حل تحلیلی معدودی وجود دارند 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 کاربردی نبوده و همچنین به علت شرایط مرزی و اولیه خاص بسیار محدود می شوند. (Barry and Sposito 1989) اما با توجه به همه این محدودیت ها هنوز هم روش های حل تحلیلی برای صحت سنجی نتایج حاصل از حل عددی معادلات انتقال-انتشار، تخمین اولیه سناریو های حرکت آلودگی، آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در معادلات انتقال-انتشار و همچنین برای برون یابی نتایج حاصل از مدل های عددی در مواقعی که گام های زمانی و مکانی بزرگ شده و روش های عددی به دلیل عدم پایداری، قادر به شبیه سازی حرکت آلاینده ها در جریان های یک بعدی نیستند، کاربرد دارند.

در حقیقت روش های حل 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 به صورت تحلیلی حل کردند و مشخص کردند یک آلاینده بعد از گذشت چه مدت زمان و پیمایش فاصله زوال می یابد. (Yadav, Jaiswal 2010) غیائی در تحقیق خود مکانیزم انتقال و انتشار را در یک نهر طبیعی کوچک بررسی، و جهت حل معادلات حاکم بر این پدیده از روش اختلافات محدود استفاده کرد و نتایج را با حل تحلیلی مورد مقایسه قرار داد. (غیائی ۱۳۶۸) چائو و همکاران^۲ یک مدل عددی سه بعدی را برای شبیه سازی پارامترهای کیفی رودخانه مورد مقایسه قرار دادند و برای ارزیابی مدل مذکور از حل تحلیلی معادله انتقال-انتشار-زوال استفاده کردند. (Chao, Jia

¹ Yadav R.R. , Jaiswal D.K. , Gulrana and Yadav H.K.

² Chao X.B. , Jia Y.F. and Shields F.D, Jr

2006) عطایی آشتیانی و همکاران^۱ معادله انتقال-انتشار همراه با ترم واکنش را با روش اختلافات محدود حل کردند و برای بررسی دقت و میزان خطای روش عددی از حل تحلیلی سود جستند. (Ataie-Ashtiani, Lockington 1996) کومار و همکاران^۲ با استفاده از تبدیل 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 بسیار مناسبی برای صحت سنجی روش های عددی می باشد. (Kumar, Jaiswal 2009) 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 کرد 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 پر هزینه و زمان بر هستند، به شدت به کار می آیند. در همین زمینه مهاجر و همکاران^۳ مدل دو بعدی برای توزیع آلودگی در رودخانه اترک ارائه دادند که برای صحت سنجی نتایج مدل خود، از نتایج آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت آب و فاضلاب استان خراسان شمالی استفاده کردند. (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

۲-۴-۵-۱ حل تحلیلی معادله انتقال-انتشار با ضریب پخش طولی و سرعت ثابت :

مارسیلی برای حل تحلیلی معادله انتقال-انتشار با فرض سرعت و ضریب پخش طولی ثابت (معادله (۶-۲)) روش زیر را ارائه داد : (Marsily 1986)

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

$$C(0, t) = C_0 \quad 0 < t < \infty \quad \text{شرط مرزی در بالادست}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 0 < x < \infty \quad (۱۹-۲)$$

ابتدا از طرفین رابطه (۶-۲) نسبت به زمان تبدیل لاپلاس گرفته می شود؛ که نتیجه زیر حاصل می گردد :

$$(SC - 0) + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (۲۰-۲)$$

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

¹ Ataie-Ashtiani B. , Lockington D.A. and Volker R.E.

² Kumar A. , Jaiswal D. and Kumar N.

³ مهاجر م. ، امینی ر. و حسین زاده مقدم ن.

$$C(x, s) = A(s) \exp \left[\frac{ux}{2D} - \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] + B(s) \exp \left[\frac{ux}{2D} + \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] \quad (21-2)$$

با اعمال شرایط مرزی ذکر شده، در رابطه (۲۱-۲) خواهیم داشت :

$$C(x, s) = \frac{C_0}{2} \exp \left[\frac{ux}{2D} - \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] \quad (22-2)$$

بنابراین می توان نوشت :

$$C(x, t) = L^{-1}[C(x, s)] = C_0 \exp \left(\frac{ux}{2D} \right) L^{-1} \left[\frac{1}{s} \exp \left[\frac{-x}{\sqrt{D}} \sqrt{\left(\frac{u^2}{4D} + s \right)} \right] \right] \quad (23-2)$$

با استفاده از جداول تبدیل لاپلاس رابطه (۲۳-۲) نتیجه می شود.

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (24-2)$$

در رابطه فوق erfc تابع خطا می باشد و سایر پارامترها مطابق روابط تشریح شده قبلی است. به لحاظ فیزیکی این مسئله بیانگر پخش آلودگی با غلظت ثابت در مبدأ مختصات در رودخانه ای است که جریان در آن با سرعت u در حرکت می باشد. بدیهی است که در زمان $t = \infty$ آلودگی در تمام رودخانه پخش شده است.

در مقاله بنتمن و پلاتزمن (۱۹۷۲) می توان حل دیگری از معادله برگرز یافت. در این مقاله ۳۵ حل دقیق مختلف ارائه شده است. (Benton and Platzman 1972)

۲-۴-۵-۶ حل عددی معادله انتقال - انتشار:

بررسی قوانین فیزیکی حاکم بر بسیاری از مسائل علمی مهندسی به مطالعاتی منتهی می شود که قادرند رفتار یک فرآیند طبیعی را شبیه سازی کنند. این معادلات در بیشتر موارد معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی می باشند که از آنها تحت عنوان معادلات حاکم نیز نام برده می شود. (Abbot and Basco 1997) در هیدرولیک محاسباتی، خیلی از مسائل به حل عددی معادلات دیفرانسیل نیاز دارند.

روش های عددی با استفاده از گسسته کردن میدان و تعریف این میدان بر اساس یک شبکه از گره ها به دست می آید. استفاده از این روش برای بدست آوردن جواب چنین معادلاتی کمک زیادی می باشد، چنانچه امروزه به پاسخ بسیاری از این معادلات دست یافته اند. در حقیقت روش های عددی ابزار مناسبی برای پیش بینی فرآیند های انتقال آلودگی را فراهم می کنند. برای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر هر میدان جریان، باید میدان مزبور به منظور بررسی جزء به جزء و دقیق تر به مجموعه ای از نقاط یا سلول ها گسسته شده یا در اصطلاح مش بندی شود. معادلات مزبور، بر روی مجموعه ای از نقاط یا سلول های شبکه با استفاده از یک سری معادلات جبری تقریب زده شده و در نهایت با حل دستگاه معادلات جبری حاصل، مقادیر تقریبی از حل معادلات بر روی کل میدان حاصل می شود.

در حالت کلی برای مدل سازی باید مراحل زیر طی شوند: (مهاجر، امینی ۱۳۹۰)

- تعریف هندسه و محدوده مورد نظر
- انتخاب پدیده های فیزیکی مورد نظر
- استخراج معادلات حاکم
- تولید شبکه
- تشخیص و تعریف شرایط مرزی^۱
- انتخاب روش عددی مناسب برای انفصال و حل معادلات
- انفصال معادلات حاکم
- حل معادلات منفصل شده
- ارزیابی و صحت سنجی

روش های عددی متعددی وجود دارند که معادله (۲-۶) را حل می کنند. برای نمونه می توان به موارد زیر اشاره کرد:

روش لپ فراگ / دافورت - فرانکل، روش برایلوسکی، روش الن - چن، روش لاکس - وندروف، روش مک کورمک، روش برایلی - مک دونالد، روش تفکیک زمانی مک کورمک، روش های A.D.I، روش چند تکراره پیش بینی کننده - تصحیح کننده، روش رو، روش کرانک - نیکلسون و...

برای بحث بیشتر به مراجع (شمسی ۱۳۷۹؛ کیامنش ۱۳۸۸؛ Tannehill, Anderson 1979; Abbot and Basco 1997) مراجعه شود.

¹ Boundary Condition

۳- فصل سوم - مدل سازی عددی توزیع آلودگی در آبراهه ها

۱-۳ مقدمه ای بر CFD

دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و یا به اختصار CFD عبارت است از تحلیل سیستم های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده های همراه نظیر واکنش های شیمیایی، بر اساس شبیه سازی کامپیوتری. CFD طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و غیر صنعتی را در بر می گیرد.

هدف نهایی توسعه و پیشرفت در زمینه CFD، رسیدن به توانایی قابل مقایسه با ابزارهای CAE (مهندسی به کمک کامپیوتر) نظیر برنامه های تحلیل تنش می باشد. CFD در طراحی سیستم های سیالاتی چند مزیت منحصر به فرد نسبت به روش های تجربی دارا می باشد :

- کاهش اساسی در زمان انجام آزمایشات و قیمت طراحی های جدید مبتنی بر مدل های شناخته شده.
- توانایی مطالعه سیستم هایی که انجام آزمایشات کنترل شده روی آنها مشکل و یا غیر ممکن می باشد. (نظیر سیستم های خیلی بزرگ)
- توانایی مطالعه سیستم ها، تحت شرایط تصادفی و بالاتر از حدود معمول آنها (نظیر مطالعات مطمئن و موضوعات تصادفی)
- عملاً سطح جزئیات نامحدود می باشد.

ساختار برنامه های CFD روش عددی است، بطوریکه مسائل جریان سیال با استفاده از این روش قابل حل می باشند. به منظور فراهم آمدن دسترسی آسان به توان حل آنها، تمام بسته های نرم افزاری تجاری CFD شامل واسطه های کاربری پیچیده ای جهت ورود پارامتر های مسائل و تحلیل نتایج می باشند. از این رو تمام برنامه ها شامل سه جز اصلی می باشند :

- پیش پردازنده
- حل کننده
- پس پردازنده

۲-۳ انواع روش های حل عددی :

تفاوت های اصلی میان روش های حل عددی وجود دارد. این تفاوت ها به روشی که در آن متغیر های جریان تقریب می خورد و فرآیند گسسته سازی صورت می گیرد، مربوط می شوند.

¹ Computational Fluid Dynamics

۱-۲-۳ روش های اختلاف محدود:

روش های اختلاف محدود مجهولات ϕ مسأله جریان را با استفاده از همسایه های هر نقطه در نقاط گره مربوط به شبکه خطوط مختصات تعیین می کنند. اغلب از بسط های سری تیلور منقطع برای بدست آوردن تقریب های اختلاف محدود مشتقات ϕ در عبارات همسایه های نقطه ϕ در هر گره شبکه و در همسایه های آن استفاده می شود. بنابراین مشتقات ظاهر شده در معادلات حاکم توسط اختلاف محدود جایگذاری شده و یک معادله جبری برای مقادیر ϕ در هر نقطه از شبکه را می دهند.

۲-۲-۳ روش عناصر محدود:

در روش های عناصر محدود از توابع تکه ای ساده (خطی یا درجه دوم) که برای عناصر ارزش داشته باشد، به منظور شرح تغییرات محلی متغیر های مجهول جریان ϕ ، استفاده می شود. معادلات حاکم با استفاده از حل دقیق ϕ کاملاً ارضا می شوند. اگر توابع تقریب تکه ای برای ϕ ، در معادله جایگذاری شوند، معادله دقیقاً ارضا نخواهد شد و یک باقیمانده برای اندازه گیری خطاها تعریف می شود. سپس باقیمانده ها (و در نتیجه خطاها) در برخی جهات توسط ضرب آنها در یک مجموعه ای از توابع وزنی و انتگرالگیری، به حداقل می رسند. در نتیجه ما یک مجموعه ای از معادلات جبری برای ضرایب مجهول توابع تقریب بدست می آوریم. تئوری عناصر محدود اولین بار برای تحلیل تنش سازه ای بیان شد.

۳-۲-۳ روش های طیفی:

روش های طیفی مجهولات را با استفاده از سری های قطع شده فوریه یا سری های چند جمله ای چبی شف^۱ تقریب می زنند. بر خلاف روش اختلاف محدود یا عناصر محدود، تقریب ها محلی نیستند اما برای تمام ناحیه محاسباتی معتبر می باشند. در این روش، مجهولات در معادله حاکم حاصل از سری های قطع شده جایگذاری می شوند. تغییراتی که منجر به معادلات جبری برای ضرایب سری های فوریه و چبی شف می شود در حقیقت همان مفاهیم باقیمانده های وزنی (متعادل کننده) در روش عناصر محدود و یا توابع تقریبی منطبق بر حل دقیق در تعدادی از نقاط شبکه را نتیجه می دهد.

۴-۲-۳ روش حجم محدود:

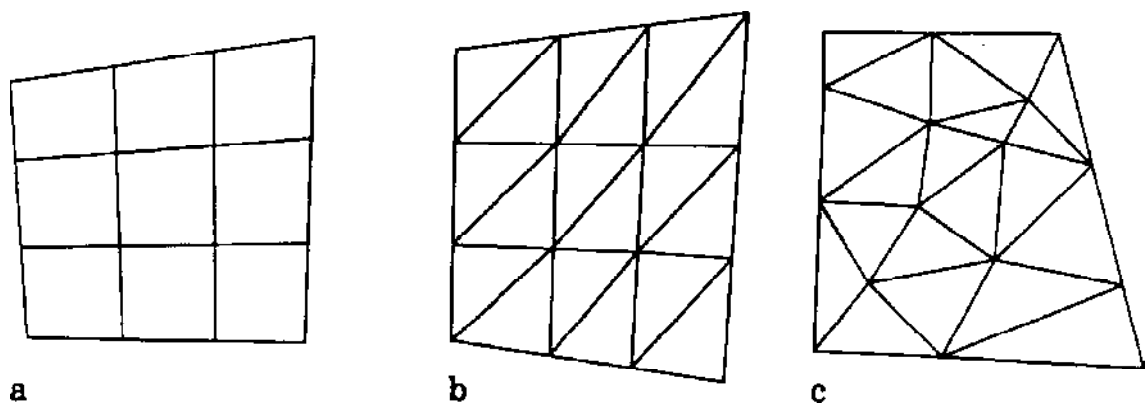
روش حجم محدود ابتدا به عنوان یک فرمول بندی اختلاف محدود ویژه توسعه یافت. در گسترش روش حجم محدود، اصول بقا بر یک ناحیه ثابت از فضا به نام حجم کنترل اعمال می شود. در روش

^۱ Chebyshev

حجم محدود در مقایسه با روش های دیگر که تا کنون بررسی شد، نقطه نظر کاملاً متفاوتی اختیار شده است. در روش های مبتنی بر بسط سری تیلور، PDE را به عنوان یک شکل صحیح و مناسب از اصول بقای (قوانین فیزیکی) حاکم بر مسأله فرض کردیم و سپس برای یافتن تقریب جبری مشتق های معادله به ابزارهای ریاضی روی آوردیم. در آنجا روش های بسط سری تیلور صرفاً برای بیان معادله های بقا (قوانین فیزیکی) در یک نقطه به صورت کاملاً ریاضی و رسمی برای PDE به کار رفت. در روش حجم محدود روابط بقا به شکل کاربردی بر ناحیه ای از فضا (حجم کنترل) اعمال می شود. این شکل انتگرالی روابط بقا معمولاً از اصول اولیه یا در بسیاری موارد از شکل بقای PDE استخراج می شود. در این روش در ابتدا، طبیعت مجزای مدل محاسباتی بررسی می شود. این روش با روش عناصر محدود تشابهات ویژه ای دارد و از طرفی می تواند نوع ویژه ای از روش اختلاف محدود نیز باشد. (Tannehill , Anderson 1979)

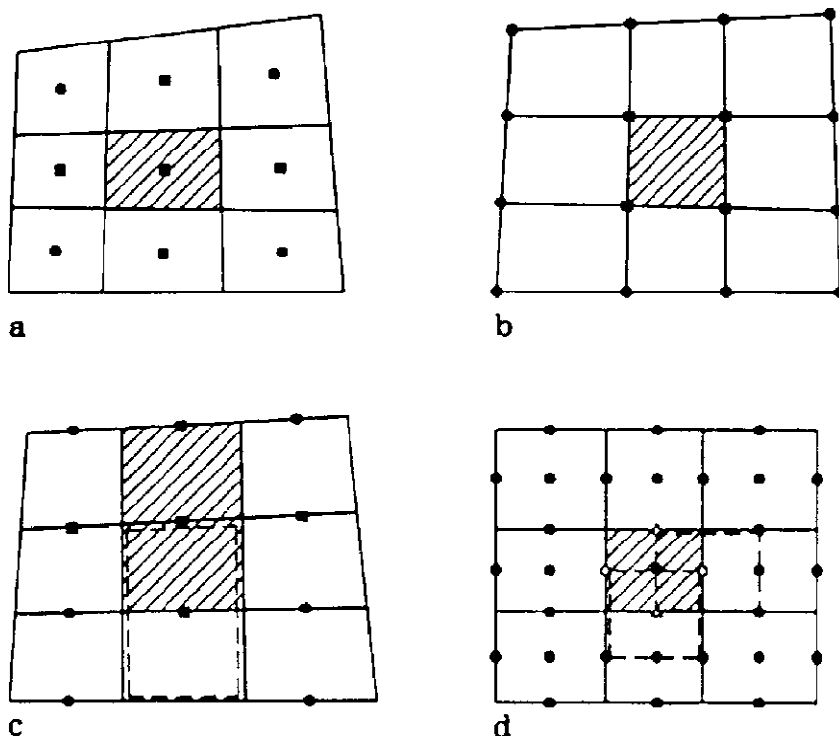
۳-۲-۴ ویژگی های روش حجم محدود:

میدان یا دامنه جریان، مانند روش عناصر محدود به مجموعه ای از سلول هایی که کل دامنه را پوشش می دهند و با هم همپوشانی ندارند، تقسیم می شود. در روش حجم محدود (یا به اختصار FVM) اصطلاح سلول به جای اصطلاح المان در روش عناصر محدود (یا به اختصار FEM)، به کار می رود. قوانین بقا برای تعیین متغیر های جریان در برخی از نقاط مجزای سلول ها به نام گره ها، به کار می روند. همانند FEM این گره ها، انواع موقعیت ها در سلول را می توانند داشته باشند، مانند مراکز سلول یا رأس های سلول یا نقاط وسط وجه های سلول. بدیهی است که آزادی قابل توجهی در انتخاب سلول ها و گره ها وجود دارد. سلول ها می توانند سه ضلعی، چهار ضلعی و... باشند. آنها همچنین می توانند یک شبکه ساخت یافته یا بدون ساختار را تشکیل دهند. آزادی هندسی کلی که در روش FEM وجود دارد، می تواند در روش FVM نیز به کار رود. شکل (۳-۱) بعضی از انواع شبکه ها را نشان می دهد. (John D. Anderson Jr. and Vierendeels 2008)



شکل (۱-۳) شبکه های معمول در FVM - a - شبکه چهار ضلعی با ساختار b - شبکه سه ضلعی با ساختار c - شبکه مثلثی بی ساختار

انتخاب گره ها می تواند به دلخواه باشد. یک انتخاب معمول برای گره ها، سلول - مرکز^۱ و سلول - رأس^۲ می باشد. پس از تعیین شکل سلول ها و موقعیت گره ها، سومین گام اساسی در روش FVM، انتخاب حجمی است که در آن قوانین بقا اعمال می شود. در شکل (۲-۳) برخی از انتخاب های احتمالی از حجم کنترل به صورت هاشور خورده نشان داده شده است. (John D. Anderson Jr. and Vierendeels 2008)



شکل (۲-۳) انتخاب های معمول گره ها در FVM

¹ Cell - Centered
² Cell - Vertex

در دو مثال اول در شکل (۲-۳)، حجم کنترل همان سلول است اما در مثال سوم، حجمی که قوانین بقا در آن اعمال شده است منطبق بر سلول های شبکه نیست. عبارت «حجم» به معنی حجم کنترلی است که قوانین بقا در آن اعمال می شود (یعنی وابسته به توابع مقدار است) در حالی که عبارت «سلول» به معنی چشمه ای^۱ از شبکه^۲ است (یعنی وابسته به گسسته سازی هندسی است).

سلول ها باید بدون همپوشانی تمام دامنه را پوشش دهند، اما برای حجم ها این الزام وجود ندارد و آنها می توانند همپوشانی داشته باشند. بدیهی است که با جدا کردن مفاهیم سلول و حجم، آزادی بیشتری نسبت به FEM و FDM در تعیین توابع مقدار ایجاد می گردد.

روش حجم محدود در واقع ترکیبی از نقاط قوت روش عناصر محدود (یعنی انعطاف پذیری هندسی) و نقاط قوت تفاضل محدود (یعنی انعطاف پذیری در تعریف میدان جریان گسسته به عبارت دیگر گسسته سازی مقادیر که وابسته به متغیرها و شارهای مرتبط با آنهاست) می باشد.

بعضی از فرمولاسیون ها نزدیک به فرمولاسیون عناصر محدود هستند^۳ و به عنوان زیر مجموعه ای از روش عناصر محدود تفسیر می شوند. (مانند شکل ۳-۲-a)، برخی از فرمولاسیون ها نزدیک به فرمولاسیون تفاضل محدود هستند^۴ و می توانند پیرو روش تفاضل محدود تفسیر شوند. بقیه فرمولاسیون ها بین این دو محدوده هستند.

ترکیبات «عناصر محدود مانند» و «تفاضل محدود مانند» در اصطلاحات فنی منجر به سردرگمی می شود. برخی از نویسندگان با پیش زمینه FEM، عبارت «المان»^۵ را برای «سلول» و غالباً عبارت سلول (کنترل) را برای حجم (کنترل) به کار می برند. اگر بخواهیم در معنی لغات دقیق شویم مفهوم المان با مفهوم سلول متفاوت است. یک شبکه از چشمه ها تشکیل شده است. یک چشمه پر اهمیت تر از یک سلول است که تنها به تقسیم بندی هندسی اشاره دارد. در روش عناصر محدود، المان، چشمه ای است که به تعریف توابع فضایی اشاره دارد. (John D. Anderson Jr. and Vierendeels 2008)

¹ Mesh

² Grid

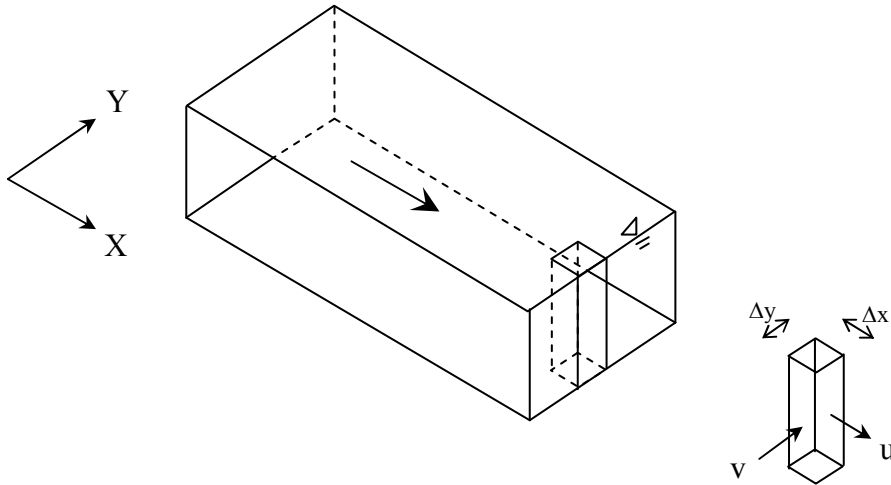
³ FEM-Like Finite Volume Methods

⁴ FDM-Like Finite Volume Method

⁵ Element

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

حجم کنترل شکل (۳-۳) را در نظر بگیرید.



شکل (۳-۳) 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 می باشد : (Piasecki and Katopodes 1997)

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

در فرمول فوق :

C : غلظت آلاینده

u و v : سرعت جریان سیال در جهت محور های X و Y

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

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

Q(t) : دبی چشمه آلوده کننده

δ : دلتای دیراک^۱

(x_s, y_s) : مختصات چشمه آلوده کننده

D_k : ضریب زوال

h : عمق جریان

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

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

به صورتی که برای یک گره مانند گره (i,j) در صورتی که چشمه آلوده کننده ای وجود داشته باشد، می توان هیدروگراف ورودی آن را با $S_{i,j}(t)$ بیان نمود. برای بحث بیشتر به مرجع (نیری ۱۳۷۸؛ Piasecki and Katopodes 1997) مراجعه شود.

۳-۴ حل عددی معادله حاکمه :

معادله دیفرانسیل جزئی حاکم بر پدیده توزیع کمیت اسکالر C در محیط سیال، همانگونه که تا کنون بدست آمده، به صورت زیر قابل بیان است :

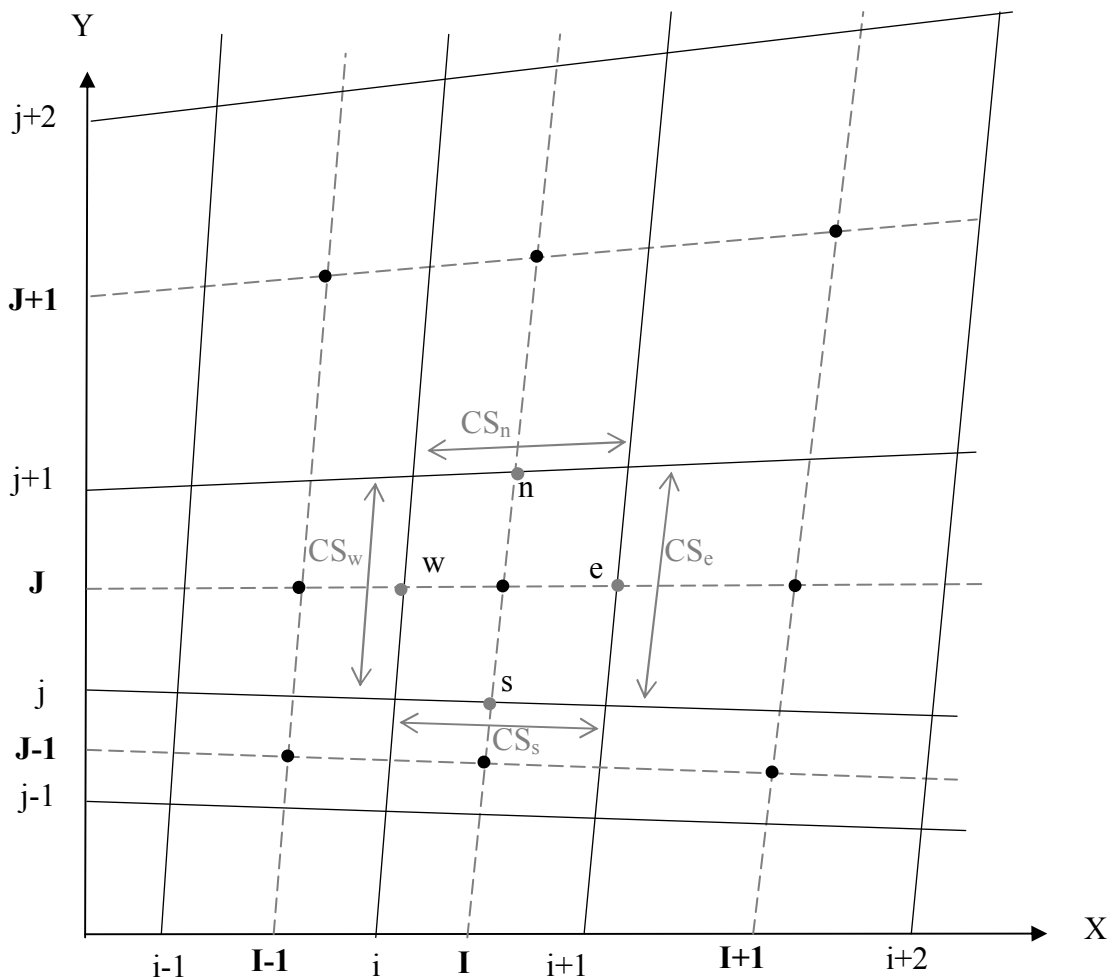
$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yx} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \\ + hD_k C + S_{i,j}(t) \end{aligned} \quad (3-3)$$

¹ Dirac Delta

مقادیر h ، C ، u و v نسبت به زمان و مکان متغیر می باشند. این بدان معناست که جریان سیال می تواند ماندگار یا ناماندگار و یا غیر یکنواخت باشد. به عبارت واضحتر معادله (۳-۳) بر توزیع آلودگی در جریان های غیر دائمی و غیر یکنواخت نیز صادق است.

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 محاسبه نمود.

برای گسسته سازی معادله از روش حجم محدود با سلول های چهارضلعی در شبکه ای غیر یکنواخت و سلول - مرکز استفاده می شود. حجم کنترل شکل (۴-۳) را در نظر بگیرید.



شکل (۴-۳) شبکه بندی میدان در روش FVM

در شکل (۴-۳) خطوط پیرنگ ممتد معرف سلول های شبکه و خطوط کمرنگ خط چین معرف نقاط مرکزی سلول هاست همچنین نقاط توپر پیرنگ نشان دهنده مراکز سلول ها و نقاط توپر کمرنگ

نشان دهنده مرکز وجه های سلول نمونه می باشد. خطوط شبکه با حروف کوچک لاتین و مراکز سلول ها با حروف بزرگ و پررنگ لاتین نام گذاری شده اند.

حال از طرفین رابطه (۳-۳) انتگرال روی حجم کنترل می گیریم.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left(\frac{\partial(hC)}{\partial t} - hD_k C \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} \right) d\Omega \\ & = \int_{\Omega} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \right\} d\Omega \quad (۴-۳) \end{aligned}$$

به کمک قضیه گرین رابطه (۴-۳) را ساده تر می کنیم.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left(\frac{\partial(hC)}{\partial t} - hD_k C \right) dx dy \\ & + \oint_{CS^+} [(uhC)dy - (vhC)dx] \\ & - \int_{CS^+} \left\{ \left[h \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] dy - \left[h \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] dx \right\} \\ & = 0 \quad (۵-۳) \end{aligned}$$

انتگرال های خط بر روی وجه های حجم کنترل به صورت رابطه (۶-۳) ساده خواهند شد.

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{\partial(hC)}{\partial t} \cdot \Omega - hD_k C \cdot \Omega \right\} \\ & + \left\{ \sum_{k=e,n,w,s} (uhC)_k \cdot \Delta y_{CS_k} - \sum_{k=e,n,w,s} (vhC)_k \cdot \Delta x_{CS_k} \right\} \\ & - \left\{ \sum_{k=e,n,w,s} \left[h \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right]_k \cdot \Delta y_{CS_k} \right. \\ & \left. - \sum_{k=e,n,w,s} \left[h \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right]_k \cdot \Delta x_{CS_k} \right\} = 0 \quad (۶-۳) \end{aligned}$$

رابطه (۶-۳)، رابطه اصلی حل عددی می باشد. در مراکز همه سلول ها رابطه فوق باید محاسبه گردد.

پارامتر $\frac{\partial(hC)}{\partial t}$ در بخش گسسته سازی زمانی و پارامترهای C و $\frac{\partial C}{\partial x}$ و $\frac{\partial C}{\partial y}$ در بخش گسسته سازی مکانی تعیین می گردد. سایر پارامترهای رابطه (۶-۳) عبارتند از :

$$\Omega = \frac{1}{2} |x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} + x_{i+1,j} \cdot y_{i+1,j+1} + x_{i+1,j+1} \cdot y_{i,j+1} + x_{i,j+1} \cdot y_{i,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j} - x_{i+1,j+1} \cdot y_{i+1,j} - x_{i,j+1} \cdot y_{i+1,j+1} - x_{i,j} \cdot y_{i,j+1}| \quad (7-3)$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{CS_e} &= x_{i+1,j+1} - x_{i+1,j} & \Delta y_{CS_e} &= y_{i+1,j+1} - y_{i+1,j} \\ \Delta X_{CS_n} &= x_{i,j+1} - x_{i+1,j+1} & \Delta y_{CS_n} &= y_{i,j+1} - y_{i+1,j+1} \\ \Delta X_{CS_w} &= x_{i,j} - x_{i,j+1} & \Delta y_{CS_w} &= y_{i,j} - y_{i,j+1} \\ \Delta X_{CS_s} &= x_{i+1,j} - x_{i,j} & \Delta y_{CS_s} &= y_{i+1,j} - y_{i,j} \end{aligned} \quad (8-3)$$

پارامترهای ضرایب پراکندگی در نقاط مرکز سلول از روابط زیر محاسبه می گردند. (ترابیان و هاشمی ۱۳۸۱)

$$D_{xx} = \sqrt{\frac{f}{8} (q_x^2 + q_y^2)} \cdot (5.9 - 5.7 \sin^2 \theta)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \sqrt{\frac{f}{8} (q_x^2 + q_y^2)} \cdot (\sin \theta \cdot \cos \theta)$$

$$D_{yy} = \sqrt{\frac{f}{8} (q_x^2 + q_y^2)} \cdot (5.9 - 5.7 \cos^2 \theta)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{q_y}{q_x} \quad q_x = u \cdot h \quad q_y = v \cdot h \quad (9-3)$$

در رابطه (۹-۳)

q_x : دبی در جهت محور x ها

q_y : دبی در جهت محور y ها

f: ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ

پارامترهای هیدرولیکی $u, v, h, D_{xx}, D_{xy}, D_{yy}$ نیز در وجه های حجم کنترل از روابط زیر تعیین می گردند.

$$\begin{aligned} u_e &= \lambda_e \cdot u_{I+1,J} + (1 - \lambda_e) \cdot u_{I,J} & \lambda_e &= \frac{\delta x_{eB}}{\delta x_e} \\ u_n &= \lambda_n \cdot u_{I,J+1} + (1 - \lambda_n) \cdot u_{I,J} & \lambda_n &= \frac{\delta y_{nB}}{\delta y_n} \end{aligned} \quad (10-3)$$

$$u_w = \lambda_w \cdot u_{l-1,j} + (1 - \lambda_w) \cdot u_{l,j} \quad \lambda_w = \frac{\delta x_{wB}}{\delta x_w}$$

$$u_s = \lambda_s \cdot u_{l,j-1} + (1 - \lambda_s) \cdot u_{l,j} \quad \lambda_s = \frac{\delta y_{sB}}{\delta y_s}$$

$$\delta x_e = \left| \frac{x_{i+2,j} + x_{i+2,j+1} - x_{i,j} - x_{i,j+1}}{4} \right|$$

$$\delta y_n = \left| \frac{y_{i,j+2} + y_{i+1,j+2} - y_{i,j} - y_{i+1,j}}{4} \right|$$

$$\delta x_w = \left| \frac{x_{i+1,j} + x_{i+1,j+1} - x_{i-1,j} - x_{i-1,j+1}}{4} \right|$$

$$\delta y_s = \left| \frac{y_{i,j+1} + y_{i+1,j+1} - y_{i,j-1} - y_{i+1,j-1}}{4} \right| \quad (11-3)$$

$$\delta x_{eB} = \delta x_{wB} = \left| \frac{x_{i+1,j} + x_{i+1,j+1} - x_{i,j} - x_{i,j+1}}{4} \right|$$

$$\delta y_{nB} = \delta y_{sB} = \left| \frac{y_{i,j+1} + y_{i+1,j+1} - y_{i,j} - y_{i+1,j}}{4} \right| \quad (12-3)$$

سایر پارامترهای v ، h ، D_{xx} ، D_{xy} و D_{yy} نیز مانند روابط (3-10) در وجوه سلول ها تعیین می گردد.

۳-۵ گسسته سازی زمانی :

رابطه (3-6) را به صورت زیر در نظر بگیرید :

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} \cdot \Omega + R = 0 \quad (13-3)$$

رابطه (3-13) را به صورت های مختلفی می توان گسترش داد از جمله : روش صریح مرتبه اول اولر، روش ضمنی مرتبه اول اولر، روش وزنی، روش های مبتنی بر چند گام زمانی و... در ادامه برخی از روش های فوق تشریح می شود. برای بحث بیشتر به مراجع (نیری ۱۳۷۸؛ شجاعی فرد و نورپور هشترودی ۱۳۷۹؛ زراتی و هادیان ۱۳۸۸؛ خداشناس ۱۳۸۹) مراجعه شود.

۳-۵-۱ روش مرتبه اول اولر :

رابطه (3-13) را به صورت زیر می نویسیم.

$$\frac{C_{l,j}^{n+1} - C_{l,j}^n}{\Delta t} \cdot h_{l,j} \cdot \Omega_{l,j} + R_{l,j}^* = 0 \quad (14-3)$$

در رابطه (۳-۱۴) اندیس ها نشان دهنده موقعیت مکانی (مراکز سلول ها) و بالانویس ها نشان دهنده گام زمانی هستند. در مورد عبارت $R_{I,J}^*$ چنانچه به جای $*$ ، n گذاشته شود روش صریح و چنانچه $n+1$ گذاشته شود روش ضمنی می گردد. در اینجا روش ضمنی بررسی نگردیده است.

مشکل عمده روش صریح، وابستگی پایداری آن به مقادیر سرعت و ابعاد سلول محاسباتی (شرط کورانت) می باشد و لازم است برای شبکه های ریز یا برای جریان های با سرعت های بالا از گام های زمانی بسیار کوچک استفاده شود و در نتیجه زمان محاسبات بسیار افزایش می یابد.

۳-۵-۱-۱ شرط پایداری کورانت:

عدد کورانت^۱ از رابطه (۳-۱۵) محاسبه می گردد:

$$CFL = \Delta t \frac{(\hat{\Lambda}_c^I + \hat{\Lambda}_c^J)}{\Omega} \quad (۳-۱۵)$$

$$\hat{\Lambda}_c^I = (|\vec{v} \cdot \vec{n}^I| + c) \cdot \Delta L^I$$

$$\hat{\Lambda}_c^J = (|\vec{v} \cdot \vec{n}^J| + c) \cdot \Delta L^J \quad (۳-۱۶)$$

c در روابط (۳-۱۶)، سرعت موج سطحی بوده و برابر \sqrt{gh} می باشد. (Blazek 2001)

۳-۵-۲ روش Runge - Kutta:

رابطه (۳-۱۴) به صورت چند مرحله ای^۲، به شکل زیر در می آید.

$$C_{I,J}^1 = C_{I,J}^n - \alpha_1 \frac{\Delta t}{h_{I,J} \cdot \Omega_{I,J}} R_{I,J}^n$$

$$C_{I,J}^2 = C_{I,J}^n - \alpha_2 \frac{\Delta t}{h_{I,J} \cdot \Omega_{I,J}} R_{I,J}^1$$

$$C_{I,J}^3 = C_{I,J}^n - \alpha_3 \frac{\Delta t}{h_{I,J} \cdot \Omega_{I,J}} R_{I,J}^2$$

⋮

$$C_{I,J}^{n+1} = C_{I,J}^m = C_{I,J}^n - \alpha_m \frac{\Delta t}{h_{I,J} \cdot \Omega_{I,J}} R_{I,J}^{m-1} \quad (۳-۱۷)$$

¹ Courant number

² Multistage scheme

ضرایب α_i با توجه به روش گسسته سازی مکانی متفاوت است. برای بحث بیشتر به مرجع (Blazek 2001) مراجعه شود.

۳-۶ گسسته سازی مکانی :

در این بخش پارامترهای C و $\frac{\partial C}{\partial x}$ و $\frac{\partial C}{\partial y}$ رابطه (۳-۶) را با الگوریتم های Central، Upwind و Quick در نقاط میانی وجوه حجم کنترل تعیین می نماییم. در انتهای این بخش مقدار این پارامترها را در نقاط مرزی بدست خواهیم آورد.

پارامتر C از روابط زیر محاسبه می گردد : (Patankar ; شجاعی فرد و نورپورهشترودی ۱۳۷۹؛ زراتی و هادیان ۱۳۸۸؛ خداشناس ۱۳۸۹)

۳-۶-۱ Central Scheme :

$$\begin{aligned} C_e &= \lambda_e \cdot C_{I+1,J} + (1 - \lambda_e) \cdot C_{I,J} & C_w &= \lambda_w \cdot C_{I-1,J} + (1 - \lambda_w) \cdot C_{I,J} \\ C_n &= \lambda_n \cdot C_{I,J+1} + (1 - \lambda_n) \cdot C_{I,J} & C_s &= \lambda_s \cdot C_{I,J-1} + (1 - \lambda_s) \cdot C_{I,J} \end{aligned} \quad (۱۸-۳)$$

ضرایب λ_i از روابط (۲-۱۰) محاسبه می گردد.

۳-۶-۲ Upwind Scheme :

$$\begin{aligned} C_e &= \max(u_e, 0) \cdot C_{I,J} + \min(u_e, 0) \cdot C_{I+1,J} & C_w &= \max(u_w, 0) \cdot C_{I-1,J} + \min(u_w, 0) \cdot C_{I,J} \\ C_n &= \max(v_n, 0) \cdot C_{I,J} + \min(v_n, 0) \cdot C_{I,J+1} & C_s &= \max(v_s, 0) \cdot C_{I,J-1} + \min(v_s, 0) \cdot C_{I,J} \end{aligned} \quad (۱۹-۳)$$

۳-۶-۳ Quick Scheme :

$$C_i = C_U + g_1(C_D - C_U) + g_2(C_U - C_{UU})$$

$$g_1 = \frac{(x_i - x_U)(x_i - x_{UU})}{(x_D - x_U)(x_D - x_{UU})} \quad g_2 = \frac{(x_i - x_U)(x_D - x_i)}{(x_D - x_U)(x_D - x_{UU})} \quad (۲۰-۳)$$

اندیس ها در روابط فوق به معنی :

i= e , n , w , s
D=Downstream

U=First Upstream
UU=Second Upstream (۲۱-۳)

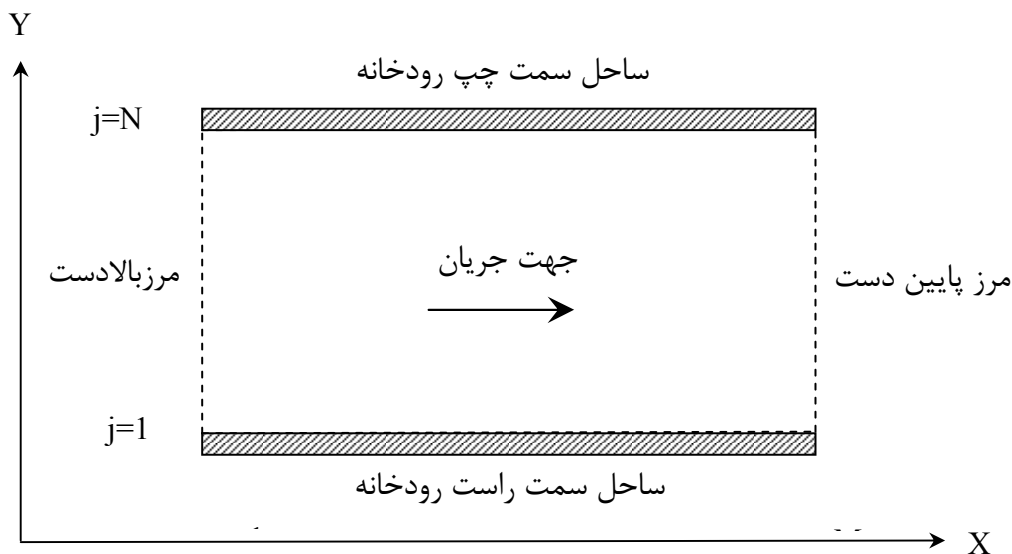
همان طور که قبلاً اشاره شد از جمله مشکلات روش حجم محدود گسسته سازی مشتقات است یکی از راه حل های رفع این مشکل، گسسته سازی به کمک روش تفاضل محدود است. برای سایر روش های حل این مشکل، به مرجع (Patankar) مراجعه شود.

پارامتر های $\frac{\partial C}{\partial y}$ و $\frac{\partial C}{\partial x}$ از روابط مرکزی زیر محاسبه می گردد : (Patankar)؛ شجاعی فرد و نورپورهشترودی ۱۳۷۹؛ زراتی و هادیان ۱۳۸۸)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_e &= \frac{C_{I+1,J} - C_{I,J}}{\delta x_e} & \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_e &= \frac{C_{I,J+1} + C_{I+1,J+1} - C_{I,J-1} - C_{I+1,J-1}}{4|\Delta y_{CS_e}|} \\ \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_n &= \frac{C_{I+1,J+1} + C_{I+1,J} - C_{I-1,J+1} - C_{I-1,J}}{4|\Delta x_{CS_n}|} & \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_n &= \frac{C_{I,J+1} - C_{I,J}}{\delta y_n} \\ \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_w &= \frac{C_{I,J} - C_{I-1,J}}{\delta x_w} & \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_w &= \frac{C_{I,J+1} + C_{I-1,J+1} - C_{I,J-1} - C_{I-1,J-1}}{4|\Delta y_{CS_w}|} \\ \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_s &= \frac{C_{I+1,J} + C_{I+1,J-1} - C_{I-1,J} - C_{I-1,J-1}}{4|\Delta x_{CS_s}|} & \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_s &= \frac{C_{I,J} - C_{I,J-1}}{\delta y_s} \end{aligned} \quad (22-3)$$

۳-۷ شرایط مرزی:

چنانچه فرض نماییم شرایط رودخانه مانند شکل (۳-۵) باشد، در آن صورت تنها وجه غربی سلول های سمت چپ شرایط بالادست و تنها وجه شرقی سلول های سمت راست شرایط پایین دست را خواهند داشت. شایان ذکر است کلیه وجوه سلول ها می توانند شرایط مرز دیواره را داشته باشند. (نیری ۱۳۷۸؛ شجاعی فرد و نورپورهشترودی ۱۳۷۹)



شکل (۳-۵) شرایط مرزی مختلف در معادله انتقال - انتشار

۳-۷-۱ شرط مرزی بالادست:

مقدار غلظت در خط مرزی مشخص است. در نتیجه مقدار C_w را داریم سایر پارامترها از روابط (۳-۲۳) بدست می آید:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_w = \frac{C_{I,J} - C_w}{\delta x_{wB}} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_w = \frac{C_{i,j+1} - C_{i,j}}{|\Delta y_{CS_w}|} \quad (۲۳-۳)$$

۳-۷-۲ شرط مرزی پایین دست:

در مرز پایین دست تغییرات در جهت طول کانال ثابت (در اینجا صفر) می شود. یعنی $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ در نتیجه خواهیم داشت:

$$C_e = C_{I,J} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_e = 0 \quad \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_e = \frac{C_{I,J+1} - C_{I,J-1}}{2|\Delta y_{CS_e}|} \quad (۲۴-۳)$$

۳-۷-۳ شرط مرزی دیواره:

در مرز دیواره برای جلوگیری از انتقال باید سرعت عمود بر مرز صفر باشد و برای جلوگیری از انتشار باید در مرزهای افقی $\left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right) = 0$ و در مرزهای عمودی $\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) = 0$ باشد.

$$C_e = \frac{C_{I,J}}{2} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_e = \frac{-C_{I,J}}{2\delta x_{eB}} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_e = \frac{C_{I,J+1} - C_{I,J-1}}{4|\Delta y_{CS_e}|} \quad \text{مرز } CS_e \text{ دیواره:}$$

$$C_n = \frac{C_{I,J}}{2} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_n = \frac{C_{I+1,J} - C_{I-1,J}}{4|\Delta x_{CS_n}|} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_n = \frac{-C_{I,J}}{2\delta y_{nB}} \quad \text{مرز } CS_n \text{ دیواره:}$$

$$C_w = \frac{C_{I,J}}{2} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_w = \frac{C_{I,J}}{2\delta x_{wB}} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_w = \frac{C_{I,J+1} - C_{I,J-1}}{4|\Delta y_{CS_w}|} \quad \text{مرز } CS_w \text{ دیواره:}$$

$$C_s = \frac{C_{I,J}}{2} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_s = \frac{C_{I+1,J} - C_{I-1,J}}{4|\Delta x_{CS_s}|} \quad \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_s = \frac{C_{I,J}}{2\delta y_{sB}} \quad \text{مرز } CS_s \text{ دیواره:} \quad (۲۵-۳)$$

۲- فصل چهارم - برنامه کامپیوتری به روش حجم محدود

۱-۴ مقدمه :

با توجه به روابط بیان شده در فصل دوم، برنامه کامپیوتری جهت توزیع آلودگی نوشته شده است. این برنامه که به زبان های برنامه نویسی Matlab و Fortran می باشد، دارای بخش های مختلفی به شرح زیر است :

- تولید شبکه محاسباتی
- محاسبات هندسی شبکه محاسباتی
- فراخوان داده های هیدرولیکی و محاسبات بر روی آنها
- محاسبات معادله انتقال - انتشار
- ترسیم خروجی های برنامه به صورت گرافیکی

بخش اصلی برنامه، محاسبات معادله انتقال - انتشار می باشد که با زبان برنامه نویسی Fortran نوشته شده است. زبان برنامه نویسی Fortran با توجه به سرعت قابل ملاحظه در انجام محاسبات، در برنامه های CFD، به شدت کاربرد دارد.

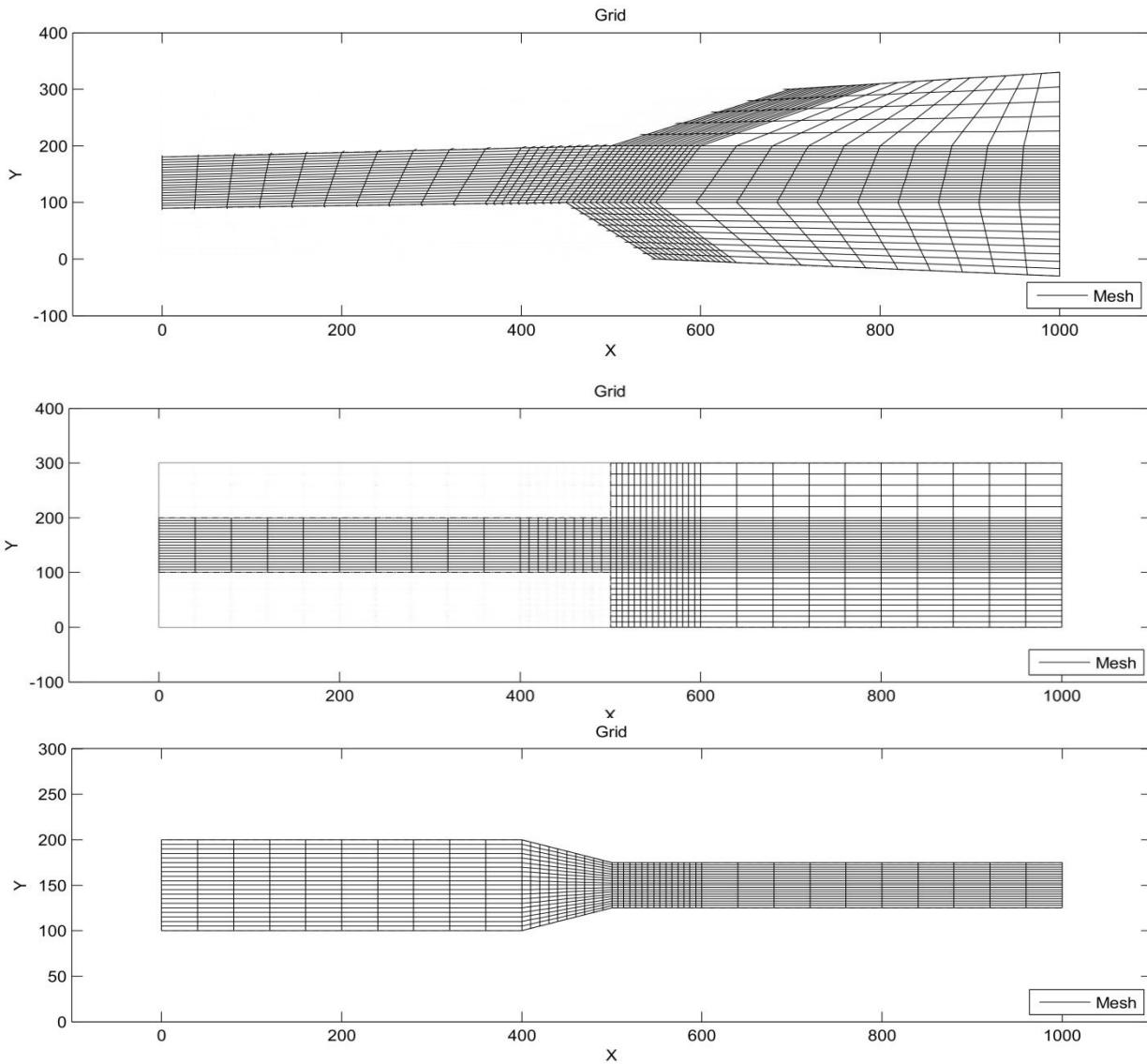
اطلاعات ورودی در قالب فایل متنی وارد برنامه شده و پس از انجام محاسبات به صورت فایل های خروجی در اختیار کاربر قرار می گیرد. برنامه جانبی دیگری این اطلاعات خروجی را به صورت گرافیکی نمایش می دهد. همچنین فایل خروجی دیگری با فرمت مناسب برای نرم افزار^۱ Tecplot ایجاد می شود.

برنامه های مربوط به ترسیم نتایج در قسمت های مختلف برنامه به زبان Matlab نوشته شده است. زبان برنامه نویسی Matlab با توجه به امکانات گرافیکی گسترده ای که دارد، برای این منظور مناسب است.

^۱ Tecplot نرم افزاری برای ترسیم داده ها به صورت دو و سه بعدی است و بخاطر قابلیت های فراوان در ترسیم و نمایش داده ها در CFD کاربرد زیادی دارد.

۲-۴ ویژگی های هندسی برنامه :

برنامه به گونه ای نوشته شده است که امکان مدل سازی شبکه های ساختار یافته غیر یکنواخت را داشته باشد. برنامه امکان مدل سازی کانالی با بازشدگی یک و دو طرفه ناگهانی و تدریجی و همچنین بسته شدگی یک و دو طرفه تدریجی را داراست. شکل (۴-۱) چند نمونه از کانال های مختلفی که برنامه امکان مدل سازی آنها را دارد، نشان می دهد.



شکل (۴-۱) شبکه محاسباتی غیر یکنواخت در کانال با شرایط هندسی مختلف

۳-۴ اطلاعات ورودی و خروجی :

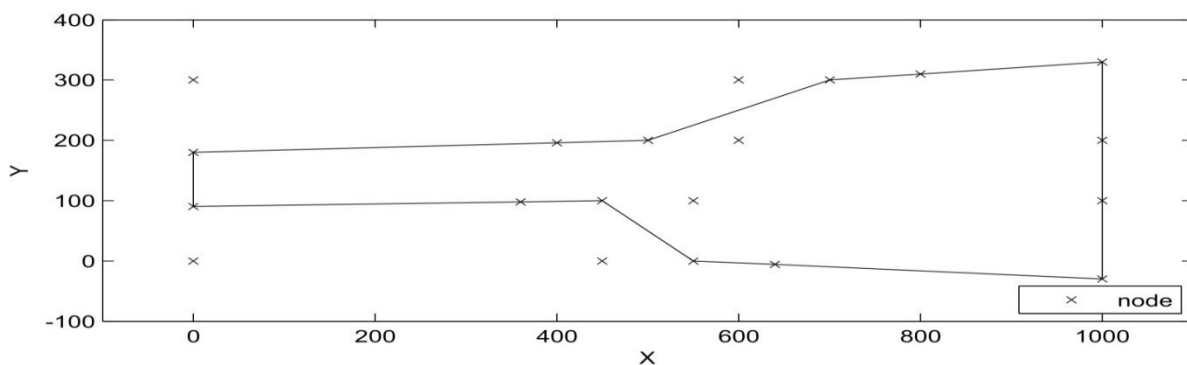
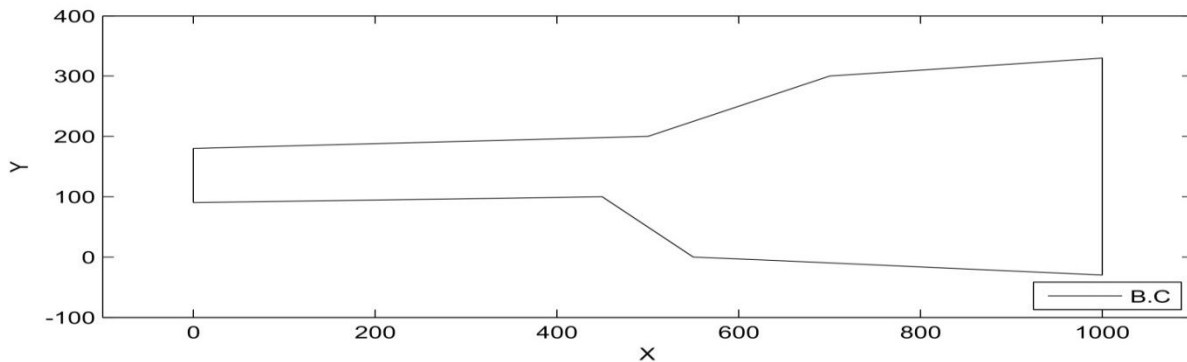
در فایل های ورودی برنامه باید اطلاعاتی به شرح زیر وارد نمود :

- مختصات (x,y) نقاط مشخص شده در شکل (۲-۴)
- تعداد سلول ها در هر لایه (مشخص کننده تراکم شبکه)
- پارامترهای هیدرولیکی متناسب با شبکه. این اطلاعات بوسیله مدل سه بعدی جریان در مرجع (عابدینی ۱۳۸۹) بدست آمده است.
- عدد کورانت (برای تعیین گام زمانی)
- شرایط اولیه غلظت
- نوع طرح^۱ عددی مورد استفاده (برنامه با طرح های عددی مختلف کار می کند. در ادامه به آنها خواهیم پرداخت).
- زمان انتهایی انجام محاسبات

در مورد شرایط اولیه، توجه به این نکته ضروری است که غلظت در لحظه اول در تمام طول کانال می تواند مقدار معینی داشته، و یا صفر باشد. نقطه (نقاط) ورود آلودگی نیز می توانند غلظت ثابتی از آلودگی را وارد کرده و یا با الگوی زمانی خاصی (مثلاً در یک لحظه یا در تمام مدت) آلودگی را وارد کنند. با توجه به این که آلودگی از مجموعه ای از نقاط نیز می تواند وارد شود لذا امکان ورود آلودگی به صورت پیوسته نیز در برنامه وجود دارد.

برنامه به صورت غیر دائمی^۲ عمل می کند در نتیجه به زمان انتهایی، برای انجام محاسبات نیازمند است. در زمان هایی بین لحظه صفر و زمان نهایی اطلاعات ذخیره شده و در فایل های خروجی ثبت می شود.

¹ Scheme
² unsteady



شکل (۴-۲) مختصات نقاط ورودی

در فایل خروجی برنامه، غلظت در نقاط محاسباتی شبکه، در چندین زمان مختلف (تا زمان نهایی برنامه) وجود دارد. دو فایل خروجی (یک فایل متنی برای استفاده برنامه ترسیم نتایج گرافیکی و یک فایل با فرمت مناسب برای نرم افزار Tecplot) توسط برنامه اصلی ایجاد می شود.

۴-۴ طرح های عددی برنامه :

همانطور که قبلاً بیان شد برنامه با طرح های عددی مختلفی کار می کند. با توجه به بخش های گسسته سازی زمانی و مکانی طرح های مختلفی را می توان ایجاد نمود. جدول (۴-۱) طرح های عددی به کار رفته در برنامه به همراه مرتبه دقت آنها را نشان می دهد. مرتبه دقت بر اساس خطای برشی^۱ گسسته سازی بدست می آید.

^۱ Truncation Error

جدول (۴-۱) طرح های عددی مختلف به کار رفته در برنامه

ردیف	طرح عددی	مرتبه دقت
۱	Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$
۲	3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$
۳	Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$
۴	4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$
۵	Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$

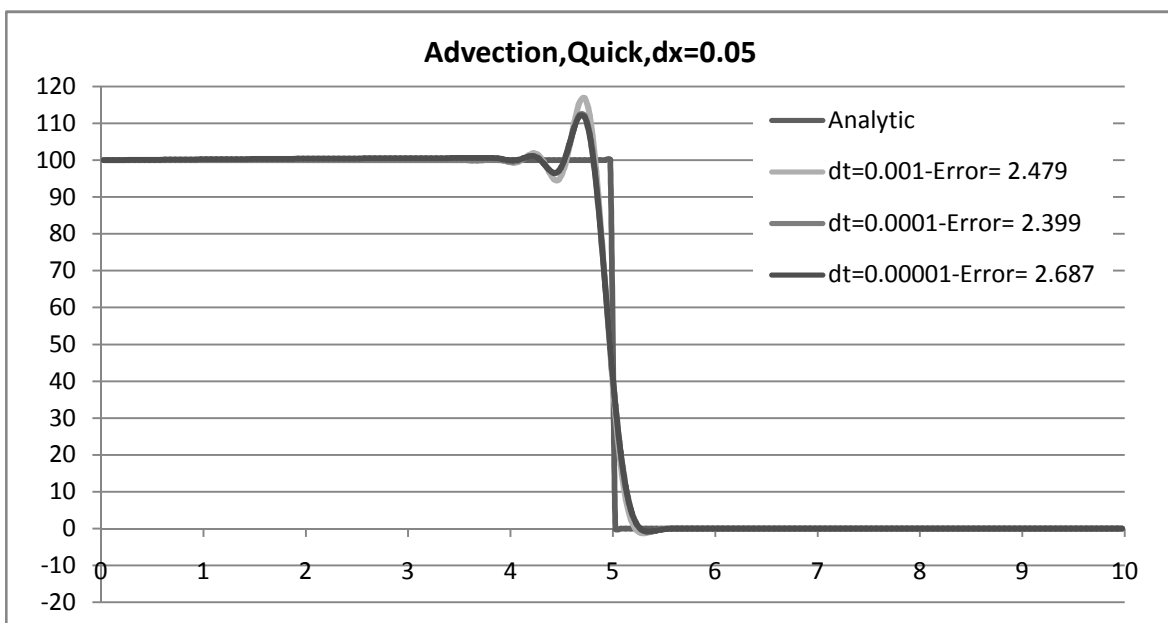
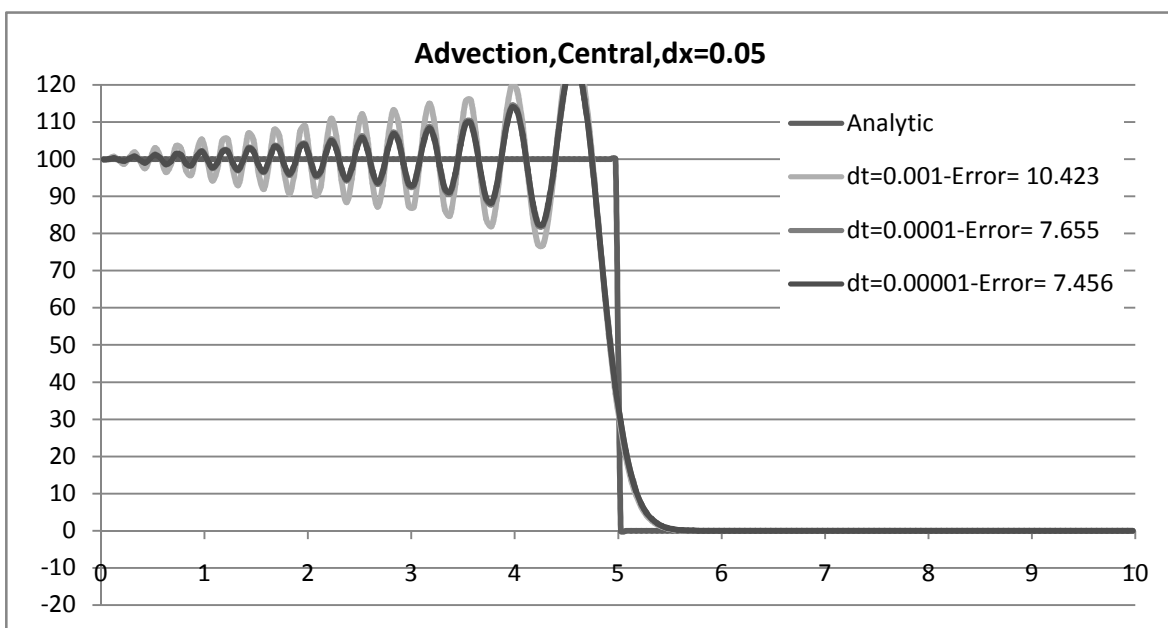
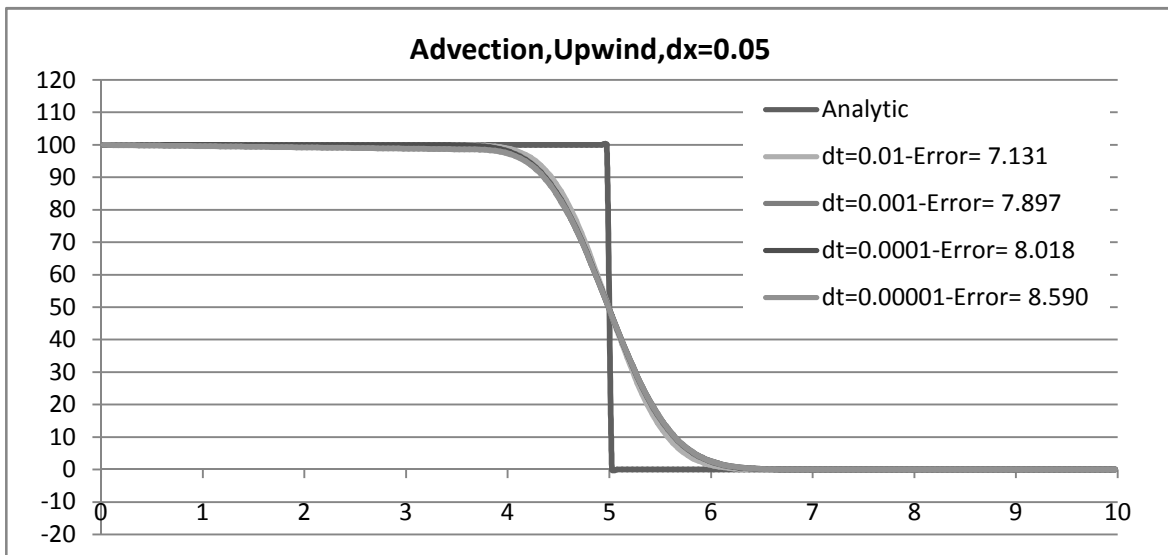
۴-۵ صحت سنجی برنامه :

اکنون که برنامه مدل سازی توزیع آلودگی آماده شده است، باید به گونه ای نتایج آن را مورد آزمایش قرار داد و از صحت پاسخ های آن مطمئن شد. این مهم در دو گروه کلی تست یک بعدی و دو بعدی انجام می شود.

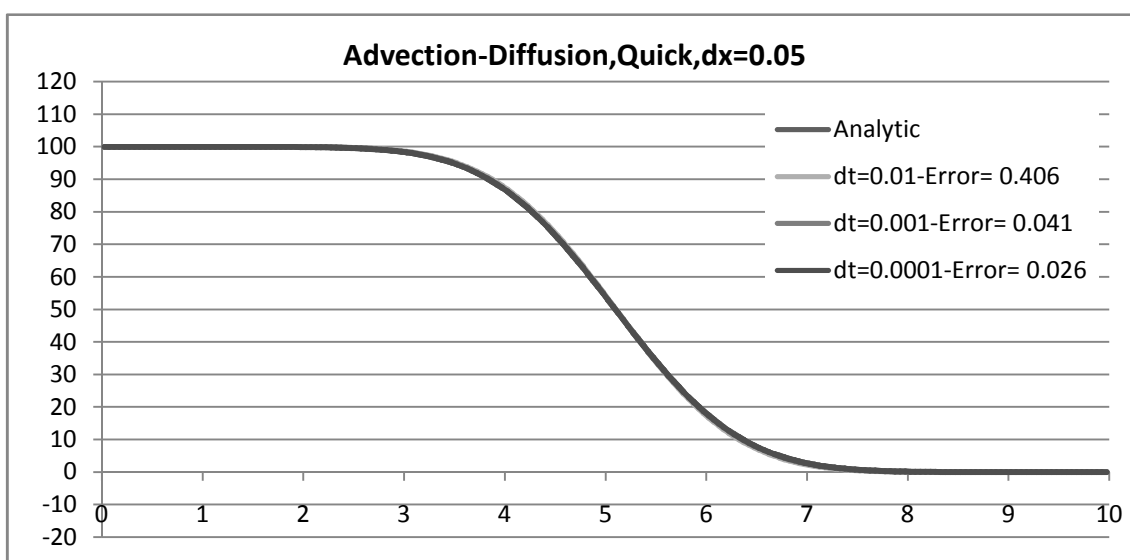
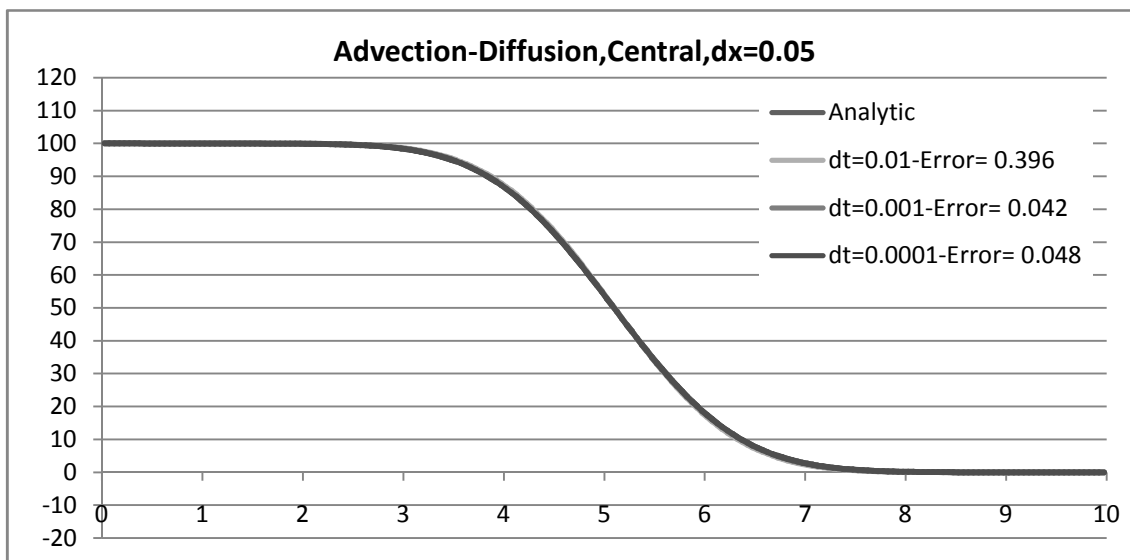
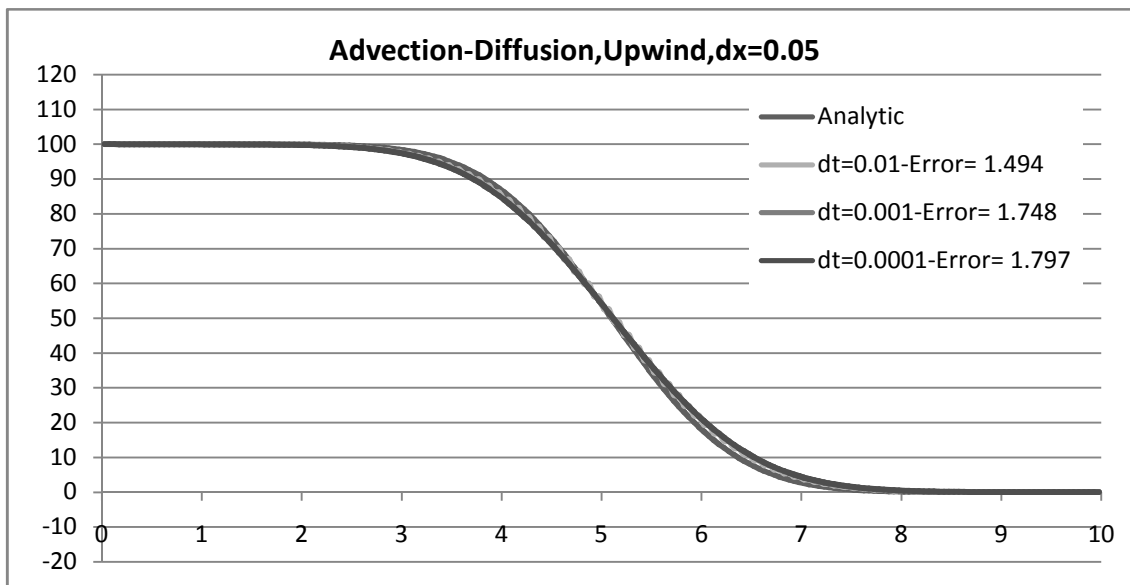
۴-۵-۱ تست یک بعدی :

در تست یک بعدی فرض بر آن می شود که کانال تنها یک بعد (بعد طول کانال) داشته باشد و از تغییرات در ابعاد دیگر صرف نظر می شود. همچنین ضریب پخش طولی و سرعت در طول کانال را نیز ثابت فرض می کنیم، در نتیجه پاسخ تحلیلی معادله انتقال - انتشار، رابطه (۲-۲۴) در این حالت صادق است. به کمک رابطه تحلیلی می توان از صحت نتایج مطمئن و دقت نتایج را مورد بررسی قرار داد.

در شکل (۴-۳) و (۴-۴) نمونه هایی از نتایج تست یک بعدی نمایش داده شده است. سایر نتایج و جدول مقایسه آنها در پیوست ۱ موجود می باشد.



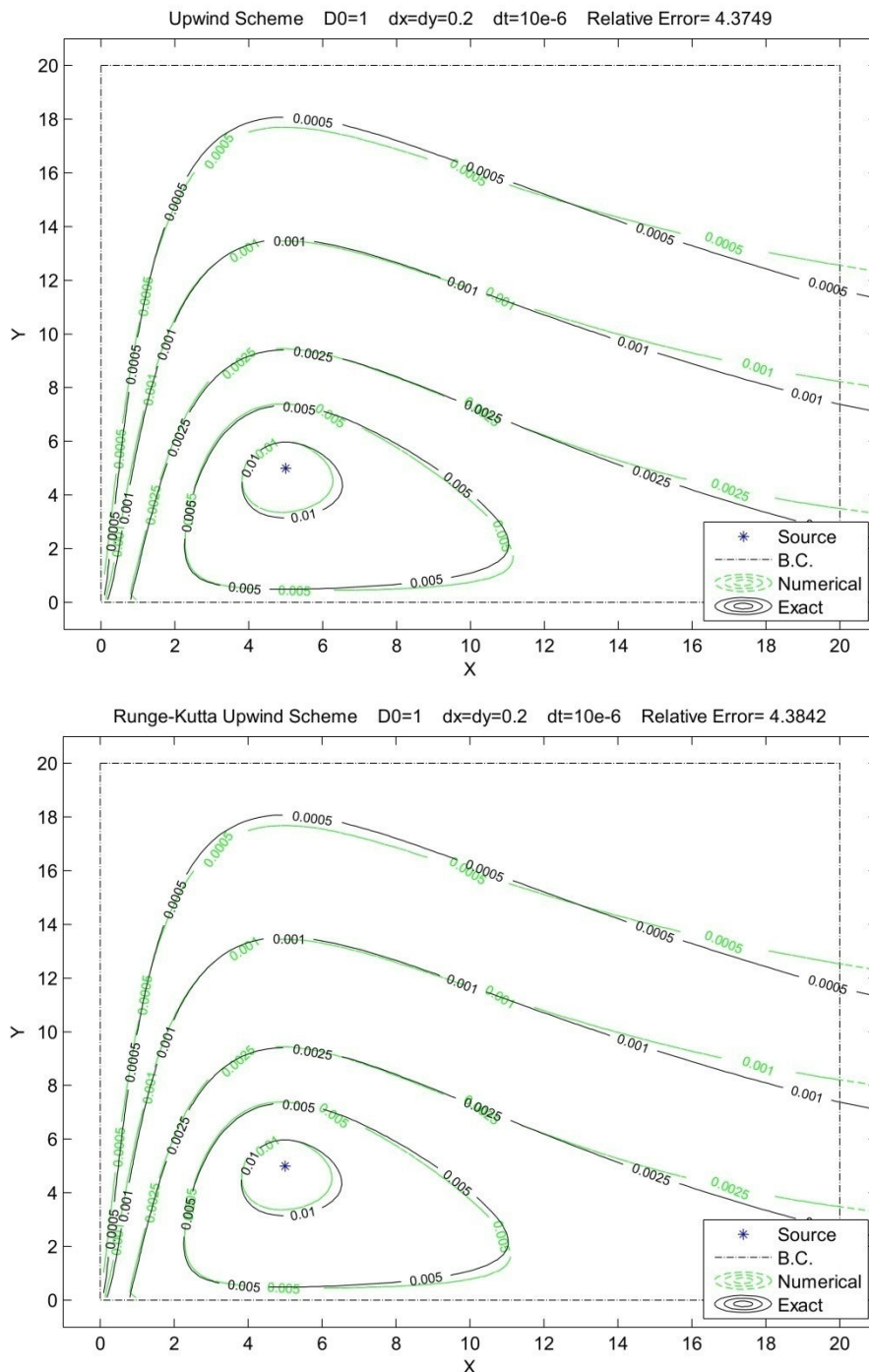
شکل (۴-۳) حل عددی و تحلیلی معادله انتقال محض در طرح های عددی و گام های زمانی مختلف



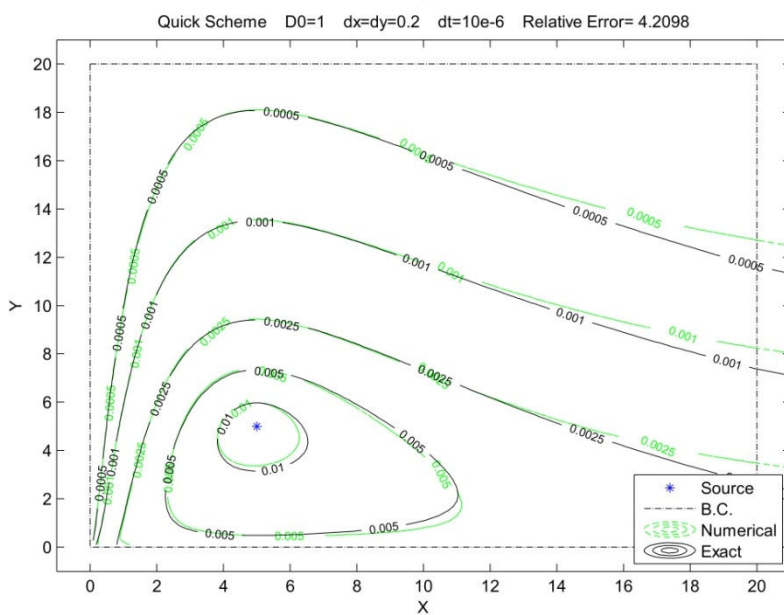
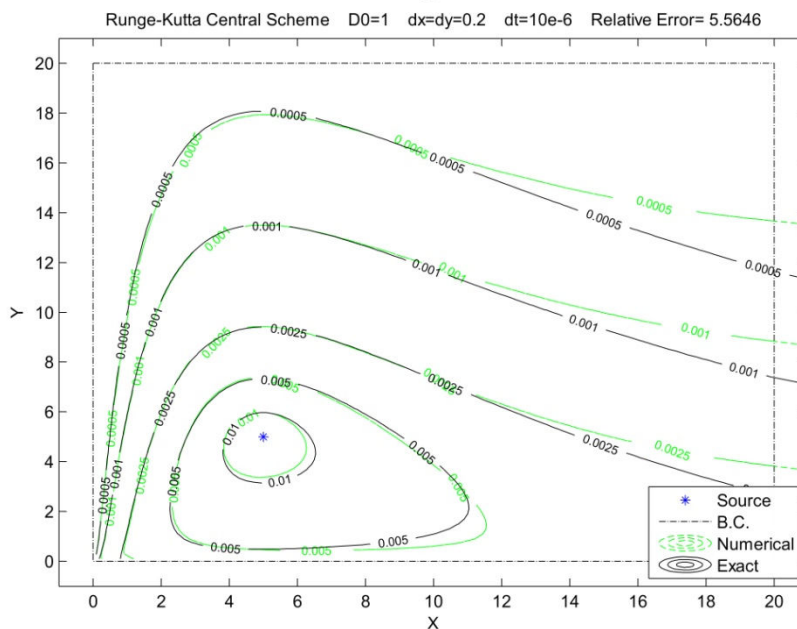
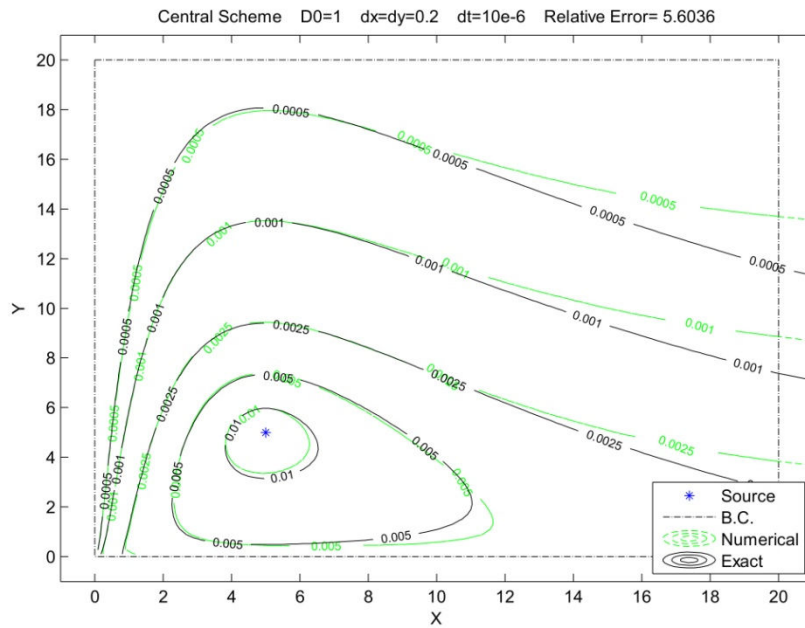
شکل (۴-۴) حل عددی و تحلیلی معادله انتقال - انتشار در طرح های عددی و گام های زمانی مختلف

۲-۵-۴ تست دو بعدی:

برای انجام تست دو بعدی نیز از حل تحلیلی در شرایط خاص بیان شده در مرجع (Zoppou and Knight 1999) استفاده شده است. برخی از نتایج حاصله در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است. سایر نتایج و جدول مقایسه آنها در پیوست ۲ موجود می باشد.



شکل (۴-۵) نمونه هایی از نتایج حل تحلیلی و عددی در حالت دو بعدی، با طرح های عددی متفاوت



ادامه شکل (۴-۵)

در ادامه، با بررسی نتایج تست های یک بعدی و دو بعدی، می توان نتیجه گرفت که طرح عددی ردیف پنجم جدول (۴-۱) یعنی Forward in Time Quick in Space یا (FTQS) نسبت به سایر طرح های عددی نتایج مطلوبتر با خطای کمتری ایجاد می کند. لذا برای حالت بازشدگی ناگهانی از این طرح عددی بهره گرفته می شود.

بر اساس نتایج بدست آمده از پیوست ۲، برای روش (FTQS) جدول (۴-۲) حاصل می شود. با توجه به این جدول برای $\Delta x = \Delta y \leq 0.2$ نتایج مناسبی بدست می آید. از این مقادیر می توان در حالت بازشدگی ناگهانی استفاده کرد.

جدول (۴-۲) خطای نسبی در روش (FTQS) در تست دو بعدی

Advection – Diffusion 2-Dimension				
Method	Order	$\Delta x = \Delta y$	Δt	Relative Error
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	1.0	1000e-6	Unstable
			500e-6	13.8485
			100e-6	13.9102
		0.5	500e-6	Unstable
			100e-6	6.6322
			50e-6	6.6380
	0.2	50e-6	Unstable	
		20e-6	4.2300	
		10e-6	4.2098	

لازم به ذکر است که ماهیت فرآیند انتقال – انتشار در طبیعت، پدیده ای سه بعدی است. اما می توان با قبول تقریب هایی که از نظر مهندسی قابل قبول باشند از مدل های دو بعدی استفاده نمود. در آب های کم عمق می توان از اثر شتاب جریان در عمق بر کل الگوی جریان صرف نظر نموده، توزیع فشار در عمق را هیدرواستاتیک فرض کرد. در این حالت از اثر جریان های چرخشی در عمق صرف نظر شده است ولی جریان های چرخشی و تغییرات سرعت در پلان در نظر گرفته شده است. در رودخانه ها از مدل های آب های کم عمق استفاده می شود چرا که در اغلب رودخانه ها حتی در زمان سیل،

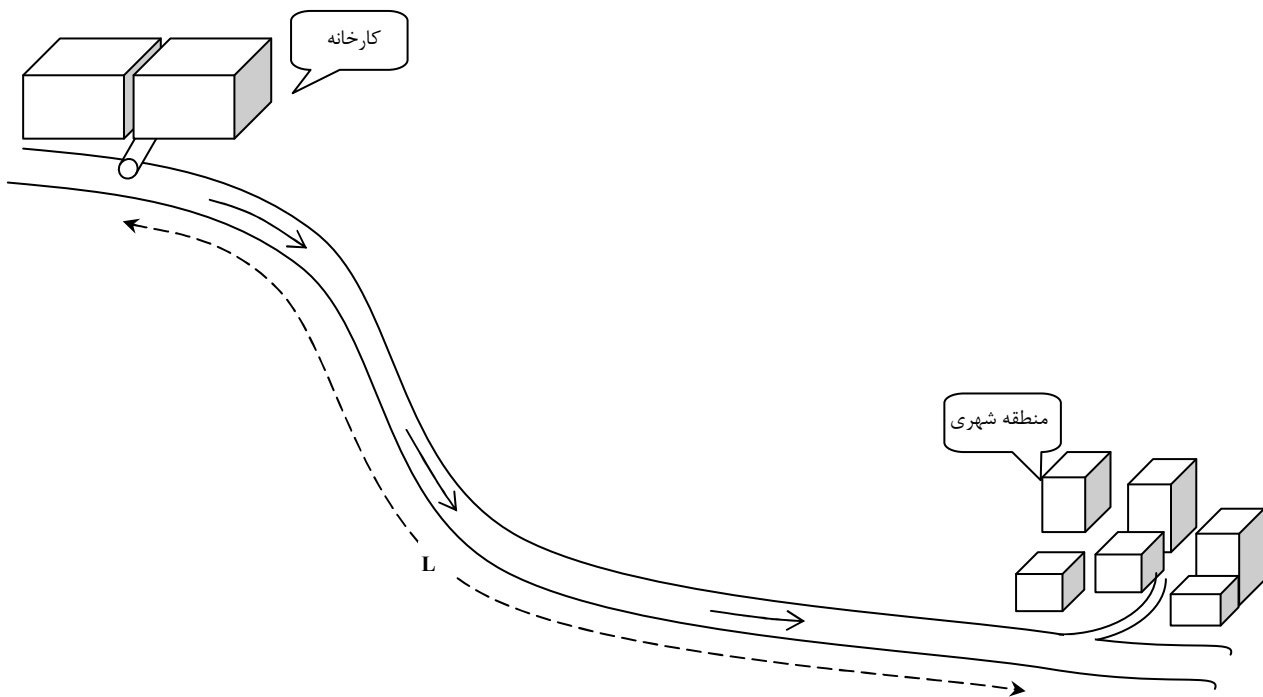
نسبت عمق جریان به ابعاد افقی و سایر شرایط به گونه ای است که می توان آنها را در رده آب های کم عمق قرار داد. لذا الگوی جریان در هندسه های پیچیده رودخانه ها توسط مدل های آب های کم عمق قابل پیش بینی بوده و خطای ناچیزی از این تقریب حاصل می شود. (زراتی و هادیان ۱۳۸۸)

۵- فصل پنجم - بررسی بازشدگی ناکهانی در نحوه توزیع آلودگی

۱-۵ مقدمه:

جریان های سطحی به علت کیفیت مناسب و راحتی برداشت همواره یکی از منابع اصلی تأمین آب بوده اند اما به علت پیشرفت فن آوری، افزایش جمعیت و مدرنیته شدن جوامع، طیف وسیعی از آلودگی ها گریبانگیر این منابع آبی بسیار ارزشمند شده است که امکان استفاده از این منابع را با مشکل مواجه ساخته یا در آینده ای نزدیک مشکل ساز خواهد کرد. از طرفی جلوگیری از ورود فاضلاب های صنعتی و شهری به آب های سطحی، به توسعه پایدار صنعت لطمه می زند.

غلظت آلودگی های مختلف پس از ورود به آب های سطحی بر اثر فرآیند انتقال - انتشار کاهش می یابد. در نتیجه پس از طی مسافتی این غلظت آنقدر کاهش می یابد که به حد مجاز (مطلوب) رسیده و مجدداً امکان استفاده از آب فراهم می شود. شکل (۱-۵) مسیر رودخانه ای را نشان می دهد که آلودگی خاصی از خروجی فاضلاب یک کارخانه در بالادست مسیر وارد رودخانه می شود، در پایین دست مسیر در فاصله ای به طول L از کارخانه، منطقه مسکونی وجود دارد که از آب رودخانه استفاده می کند.



شکل (۱-۵) پلانی از مسیر رودخانه

آلاینده برای مصرف در منطقه مسکونی $0/01$ غلظت اولیه باشد، فرض کنید با طی مسافت L' به این غلظت مجاز برسد. حال اگر L' مسافتی کمتر از L باشد امکان استفاده از آب رودخانه در منطقه

مسکونی وجود دارد. اما اگر L' بیش از L باشد، امکان استفاده از آب در منطقه مسکونی وجود ندارد. در نتیجه یا باید در منطقه مسکونی آب برداشت نشود و یا اساساً فاضلاب کارخانه وارد رودخانه نگردد. با توجه به مطالب پیشین هیچ کدام از موارد فوق امکان پذیر نیست. برای حل این مشکل راه کار های زیر وجود دارد :

- آلودگی با غلظتی کمتر وارد رودخانه گردد.
- آب مورد استفاده در منطقه مسکونی تصفیه شود.
- طول آلوده (L') به طریقی کاهش یابد.

دو مورد اول هزینه بر است و راه کار مطلوبی به نظر نمی رسد، اما در مورد راه کار سوم، چنانچه بتوان در آب اختلاط ایجاد کرد می توان L' را کاهش داد. اگر اختلاط آب بوسیله سیستم های مکانیکی انجام شود، هزینه بر بوده و مطلوب نیست؛ پس باید به دنبال روشی بود که به صورت طبیعی در آب اختلاط ایجاد شده و به تبع آن پخشیدگی آلاینده افزایش یافته و در نتیجه طول L' به کمتر از طول L کاهش یابد.

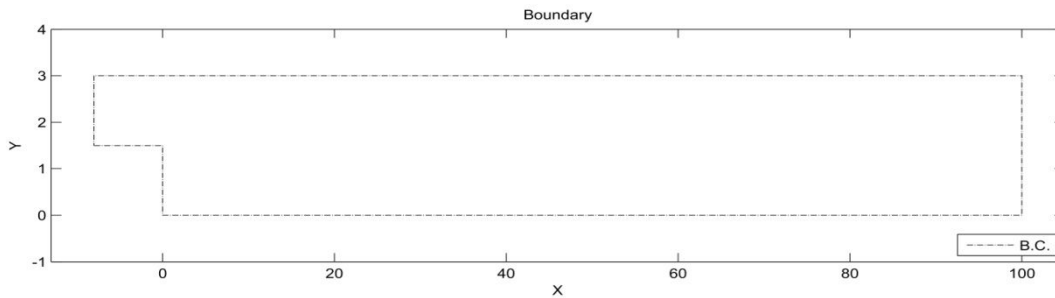
۲-۵ هدف پایان نامه :

برای ایجاد اختلاط طبیعی بیان شده در بخش قبل، می توان در مسیر کانال بازشدگی ناگهانی را ایجاد نمود. بازشدگی ناگهانی سبب ایجاد گردابه در طول مسیر می شود. گردابه مانند یک همزن طبیعی عمل کرده و پخش مواد آلاینده را بهبود می بخشد. این گردابه می تواند به صورت طبیعی در طول کانال موجود بوده باشد و یا به صورت مصنوعی آن را ایجاد نمود.

حال این سوال مطرح است که بازشدگی چه مقدار سبب بهبود پخش آلاینده می گردد، یا به عبارت دیگر طول L' چه مقدار کاهش می یابد. همچنین تأثیر عرض بازشدگی چگونه است. می دانیم بر اثر افزایش عرض بازشدگی، طول گردابه افزایش می یابد. آیا با زیاد شدن عرض بازشدگی پخش آلاینده هم بهتر می شود. تغییر شرایط هیدرولیکی (تغییر دبی، تغییر سرعت و...) چه تأثیری بر پخش آلاینده در این حالت می گذارد. در صورت وجود بازشدگی، چه نقطه ای برای ورود آلودگی مناسب تر است. در ادامه به این سوالات و سوالاتی از این قبیل، پاسخ داده خواهد شد.

۳-۵ شرایط هندسی بازشدگی:

کانالی مستطیلی با عرض ۳ متر و طول ۱۰۰ متر را در نظر می‌گیریم. (شکل (۲-۵)). چنانچه نسبت عرض بازشدگی به عرض کل کانال را نسبت بازشدگی بنامیم؛ نسبت های بازشدگی ۰/۱ تا ۰/۵ را مورد مطالعه قرار خواهیم داد.



شکل (۲-۵) شرایط هندسی کانال

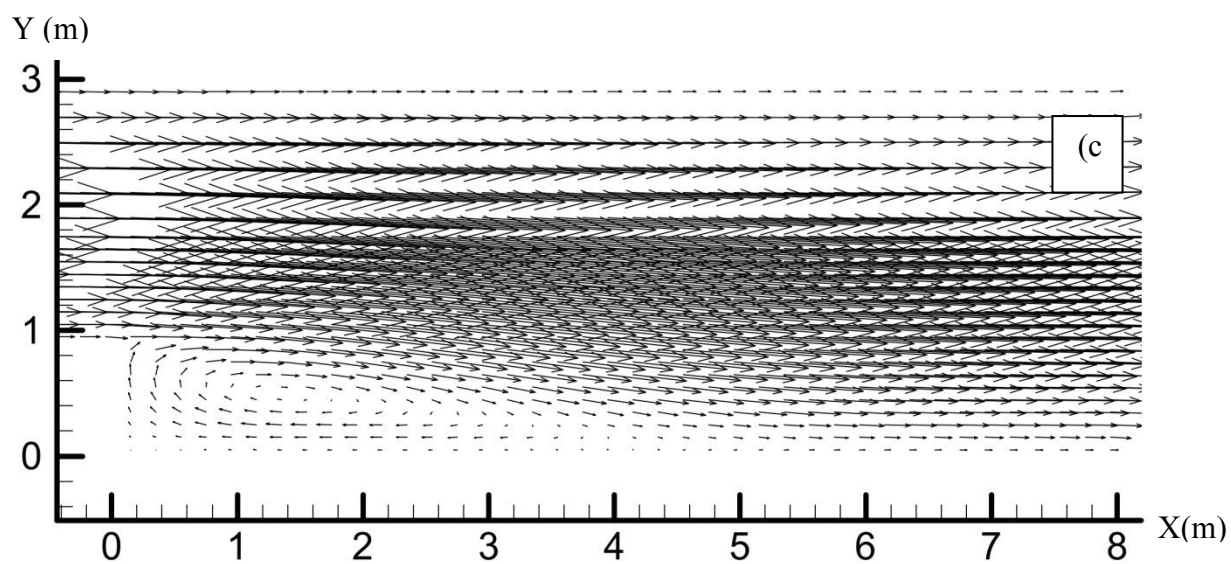
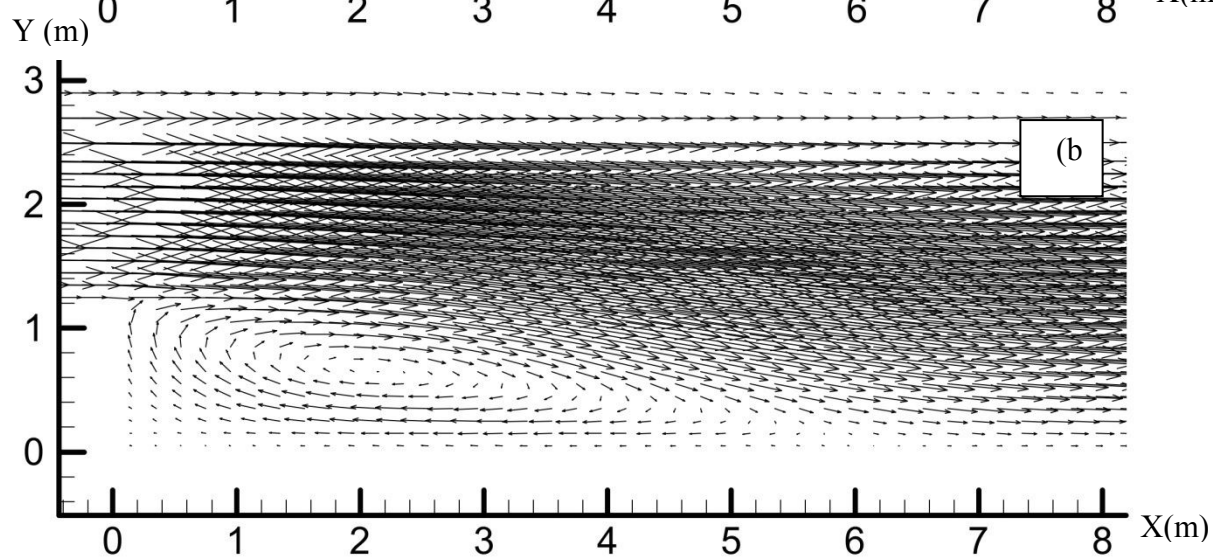
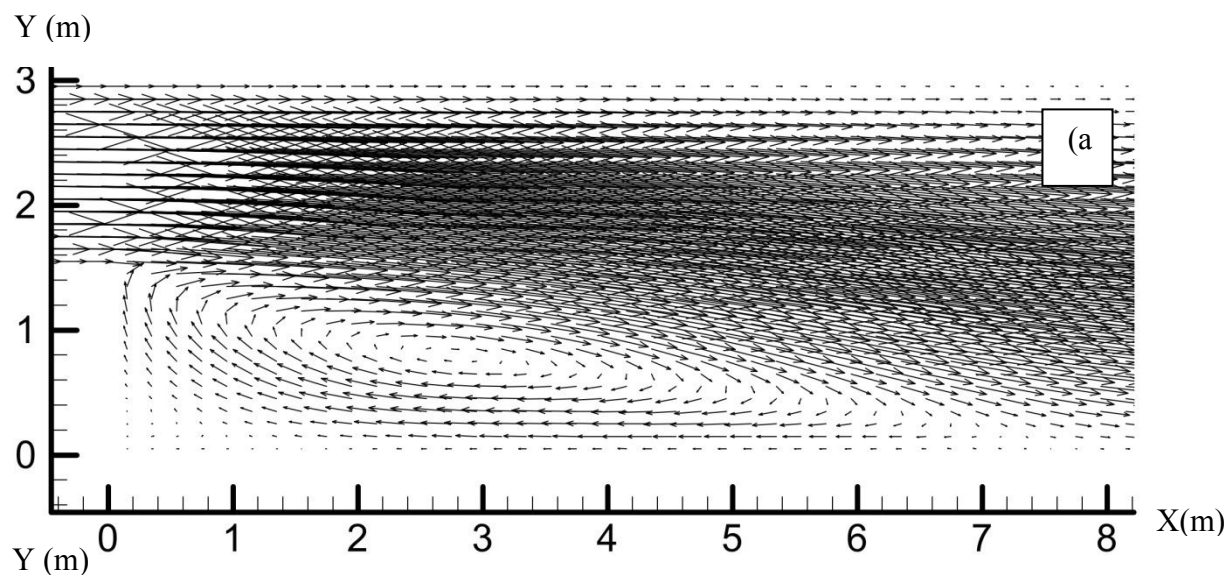
۴-۵ شرایط هیدرولیکی بازشدگی:

فرض کنید در کانال در نسبت های مختلف بازشدگی شرایط هیدرولیکی جدول (۴-۱) حاکم باشد. شرایط جریان را دائمی فرض کرده و ضریب شزی جریان را ۵۵/۵ در نظر می‌گیریم. در جدول (۵-۱) در حالت دوم دبی عبوری دو برابر شده است.

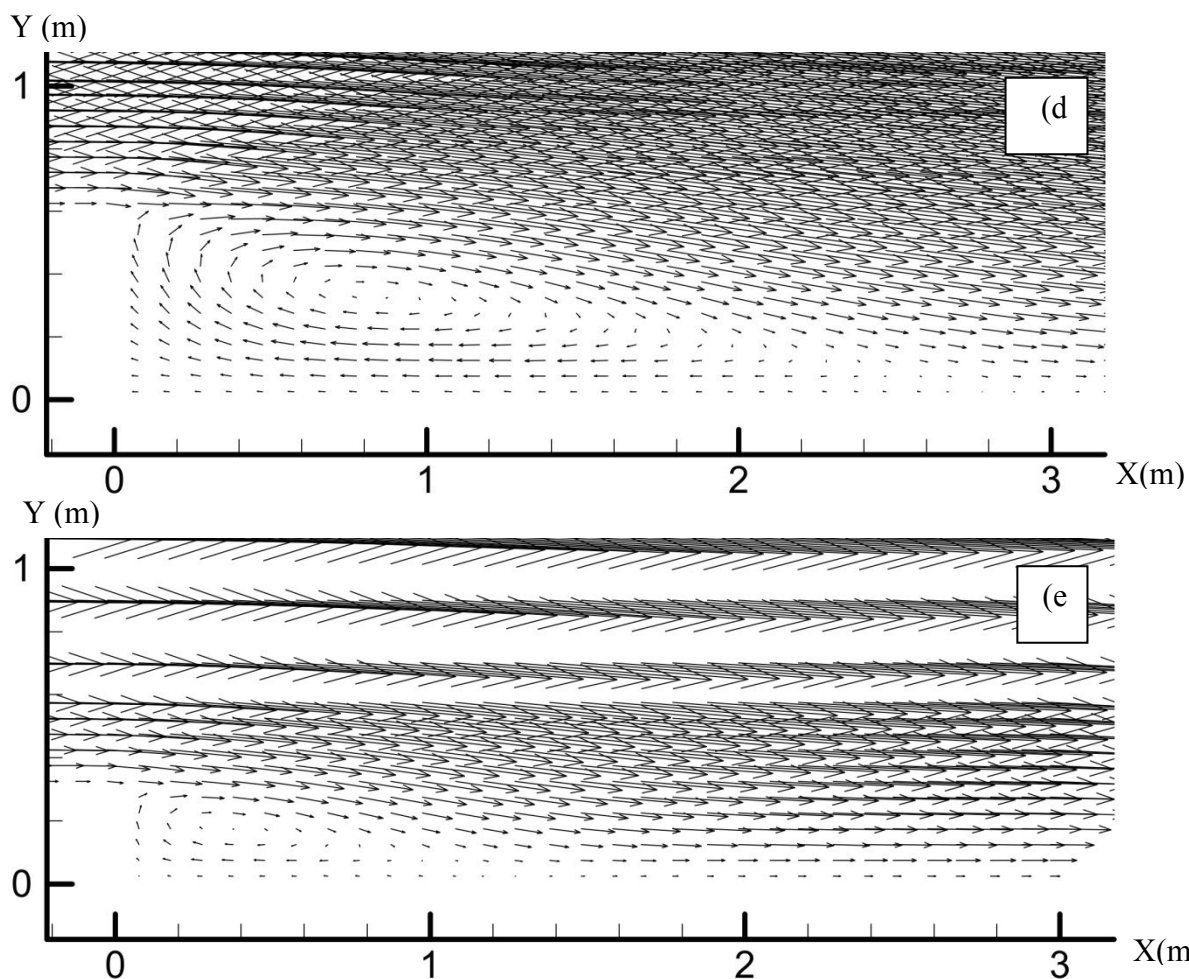
جدول (۵-۱) شرایط هیدرولیکی کانال

طول گردابه تشکیل شده (m)	سرعت انتهای کانال (m/s)	سرعت ابتدای کانال (m/s)	دبی عبوری (m ³ /s)	ارتفاع آب (m)	عرض انتهای کانال (m)	عرض باز شدگی (m)	نسبت بازشدگی	
۷/۹	۰/۱۱۶۷	۰/۲۳۳۳	۰/۱۷۵	۰/۵	۳	۱/۵	۰/۵	حالت اول
۶/۵	۰/۱۱۶۷	۰/۱۹۴۴	۰/۱۷۵	۰/۵	۳	۱/۲	۰/۴	
۴/۹	۰/۱۱۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۷۵	۰/۵	۳	۰/۹	۰/۳	
۳/۱	۰/۱۱۶۷	۰/۱۴۵۸	۰/۱۷۵	۰/۵	۳	۰/۶	۰/۲	
۱/۵	۰/۱۱۶۷	۰/۱۲۹۶	۰/۱۷۵	۰/۵	۳	۰/۳	۰/۱	
۰	۰/۱۱۶۷	۰/۱۱۶۷	۰/۱۷۵	۰/۵	۳	۰	۰/۰	
۷/۹	۰/۲۳۳۳	۰/۴۶۶۷	۰/۳۵	۰/۵	۳	۱/۵	۰/۵	حالت دوم
۶/۷	۰/۲۳۳۳	۰/۳۸۸۹	۰/۳۵	۰/۵	۳	۱/۲	۰/۴	
۴/۹	۰/۲۳۳۳	۰/۳۳۳۳	۰/۳۵	۰/۵	۳	۰/۹	۰/۳	
۳/۰	۰/۲۳۳۳	۰/۲۹۱۷	۰/۳۵	۰/۵	۳	۰/۶	۰/۲	
۱/۴	۰/۲۳۳۳	۰/۲۵۹۳	۰/۳۵	۰/۵	۳	۰/۳	۰/۱	
۰	۰/۲۳۳۳	۰/۲۳۳۳	۰/۳۵	۰/۵	۳	۰	۰/۰	

نمودار های سرعت جریان پیرامون بازشدگی را در شکل (۵-۳) می توان دید.



شکل (۳-۵) نمودار سرعت در نسبت های مختلف بازشدگی (a) ۰/۵ (b) ۰/۴ (c) ۰/۳



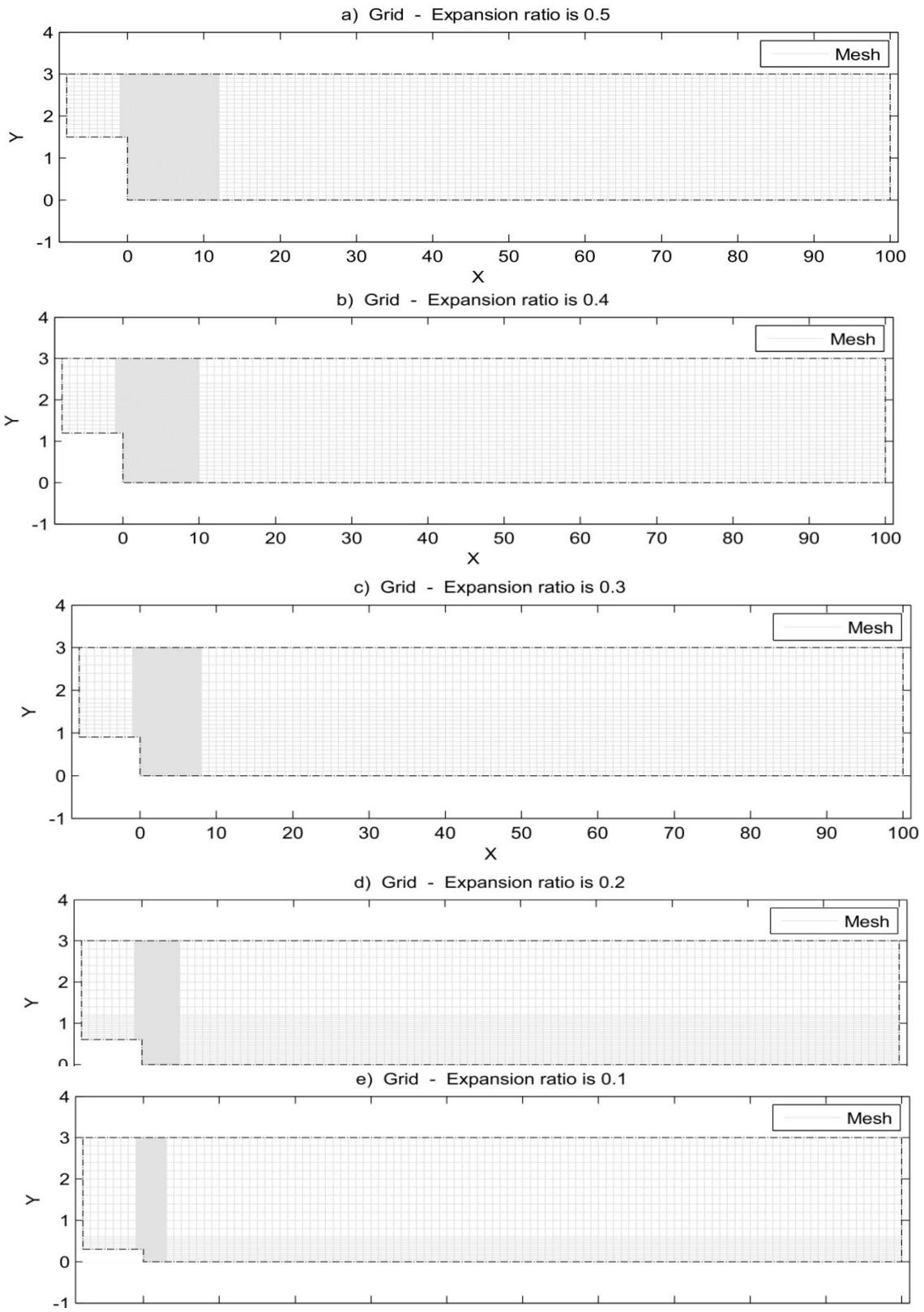
ادامه شکل (۳-۵) نمودار سرعت در نسبت های مختلف بازشدگی (d) ۰/۲ (e) ۰/۱

نمودارهای فوق بر مبنای برنامه کامپیوتری مرجع (عابدینی ۱۳۸۹) بدست آمده است.

۵-۵ شبکه بندی محاسباتی در حالات مختلف بازشدگی:

در هر کدام از نسبت های بازشدگی شبکه بندی غیر یکنواخت منحصر به فردی به کار رفته است.

شکل (۴-۵) شبکه های مختلف به کار رفته را نمایش می دهد.



شکل (۴-۵) شبکه محاسباتی در حالات مختلف بازشدگی

۵-۶ نتایج توزیع آلودگی در حالات مختلف بازشدگی :

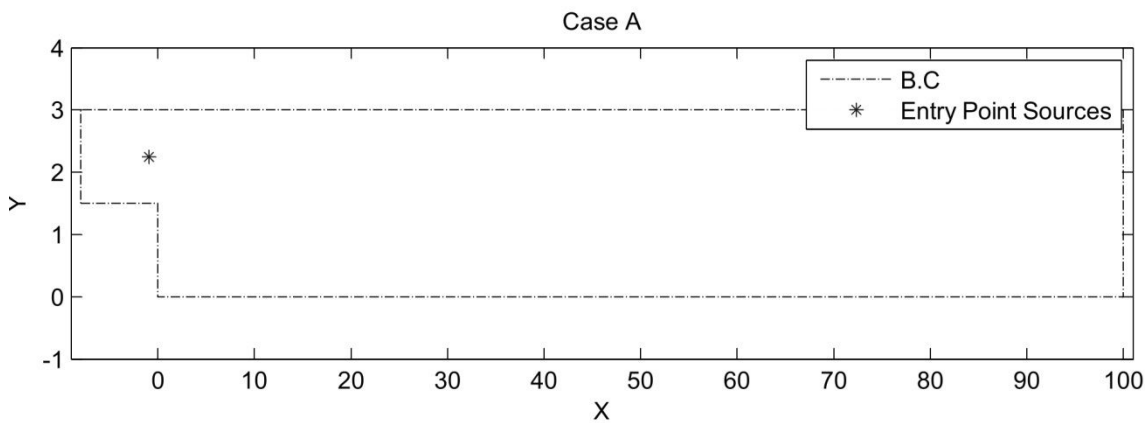
برای بررسی تأثیر نقطه ورود آلودگی بر توزیع آلودگی، نقاط زیر تعریف می گردد :

- Case A : ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل از بازشدگی
- Case B : ورود آلودگی از کنار ساحل سمت بازشدگی، قبل از بازشدگی
- Case C : ورود آلودگی در نقطه بازشدگی
- Case D : ورود آلودگی در مرکز گردابه (تعیین مرکز گردابه با توجه به نمودارهای سرعت جریان در هر حالت، جداگانه انتخاب شده است).
- Case E : ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض انتهایی کانال (با تغییر در نسبت بازشدگی این نقطه تغییر نمی کند)

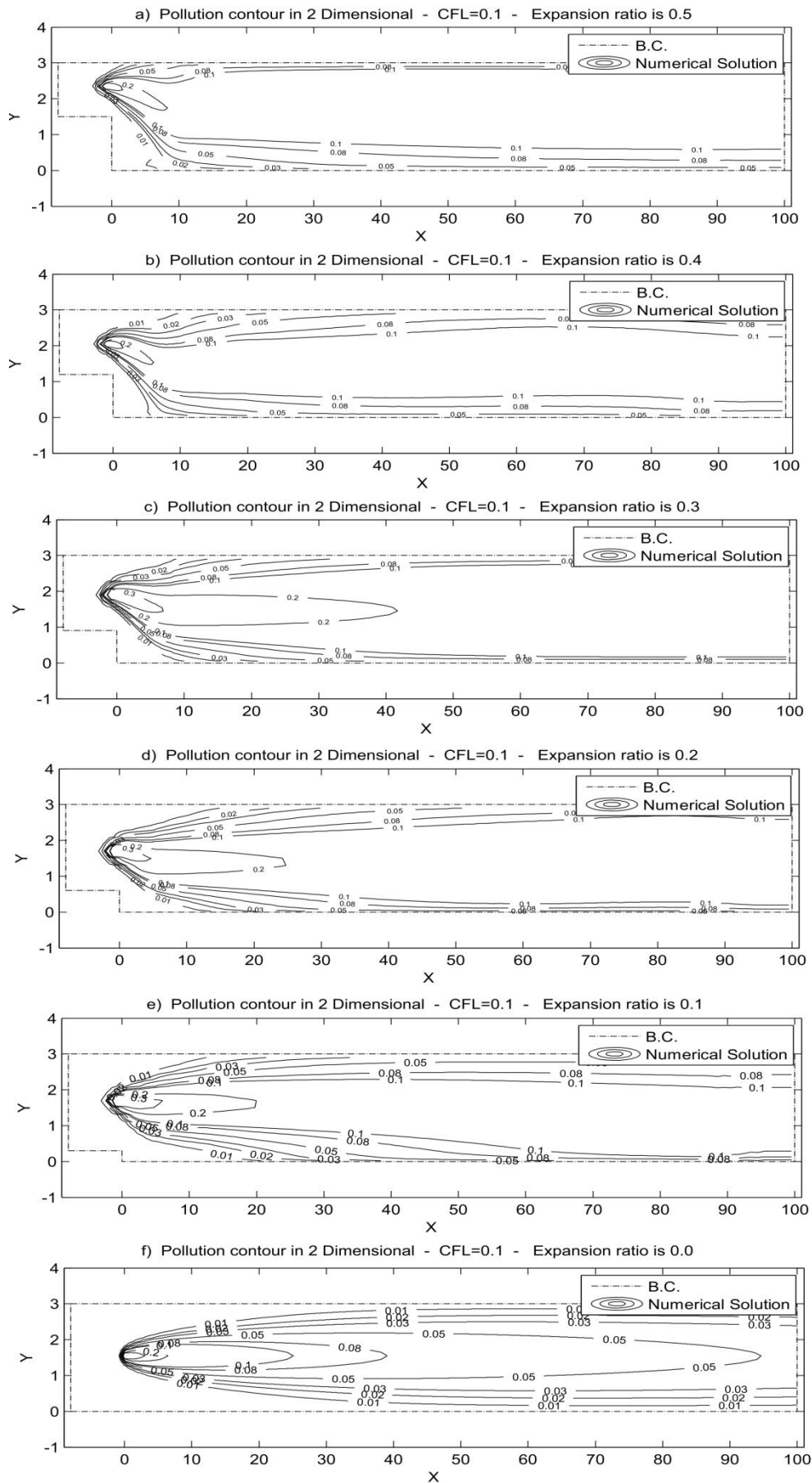
در ادامه تمامی موارد فوق به صورت جداگانه بررسی می گردد.

۵-۶-۱ Case A ورود آلودگی از مرکز کانال، قبل از بازشدگی :

شکل (۵-۵) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case A را در حالت نسبت بازشدگی ۰/۵ نمایش می دهد. در شکل (۵-۶) نمودارهای توزیع آلودگی در حالت Case A ترسیم شده است.

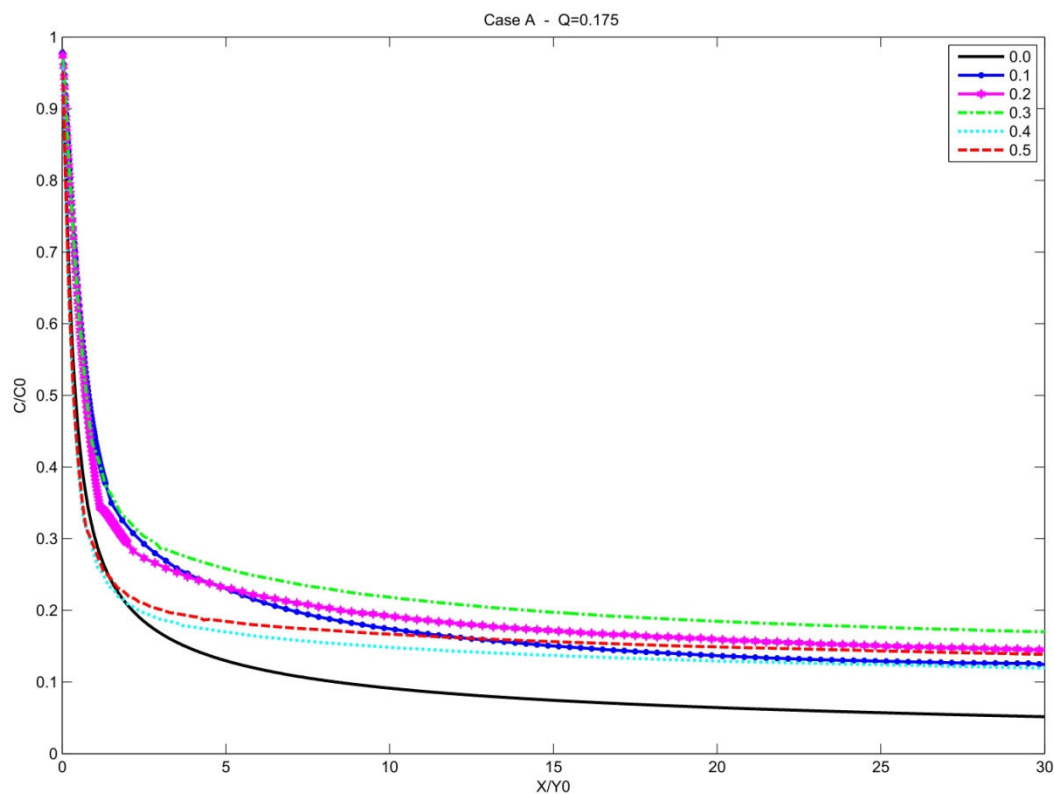


شکل (۵-۵) موقعیت ورود آلودگی Case A



شکل (۵-۶) توزیع آلودگی در حالت Case A

چنانچه نمودار یک بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول نسبی کانال (نسبت طول کانال به عرض انتهایی کانال) رسم نماییم، آنگاه می توان حالات مختلف بازشدگی را با یکدیگر مقایسه کرد. به عبارت دیگر این نمودار میزان تأثیر بازشدگی های مختلف بر طول L' را نشان می دهد. شکل (۷-۵) این نمودار ها را برای همه نسبت های بازشدگی نشان می دهد. شایان ذکر است که فاصله در این نمودار از نقطه ورود آلودگی (و نه نقطه شروع بازشدگی) در نظر گرفته می شود.



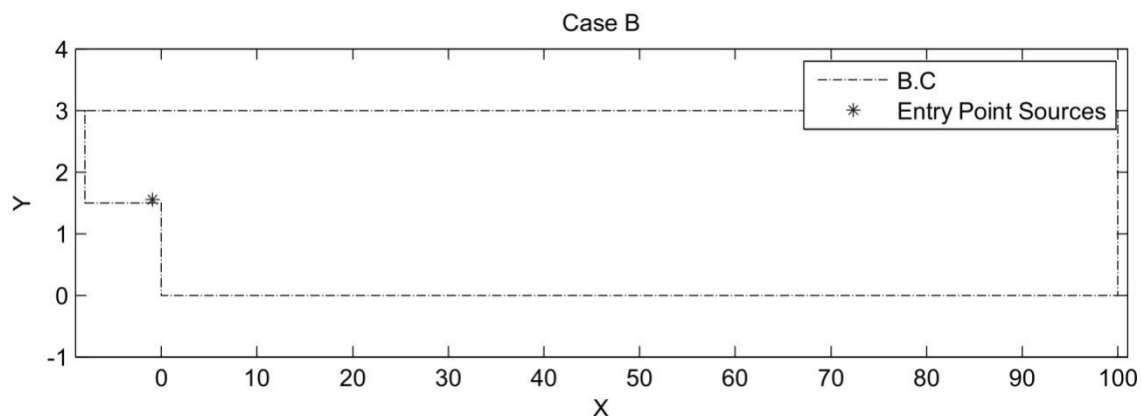
شکل (۷-۵) تأثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵.

از شکل (۷-۵) استنباط می شود که تقریباً در همه حالات، بازشدگی تأثیر منفی داشته و باعث افزایش طول L' می شود. در نتیجه انتخاب نقطه ورود آلودگی بسیار حائز اهمیت است به گونه ای که انتخاب غلط باعث کاهش کارایی بازشدگی می شود.

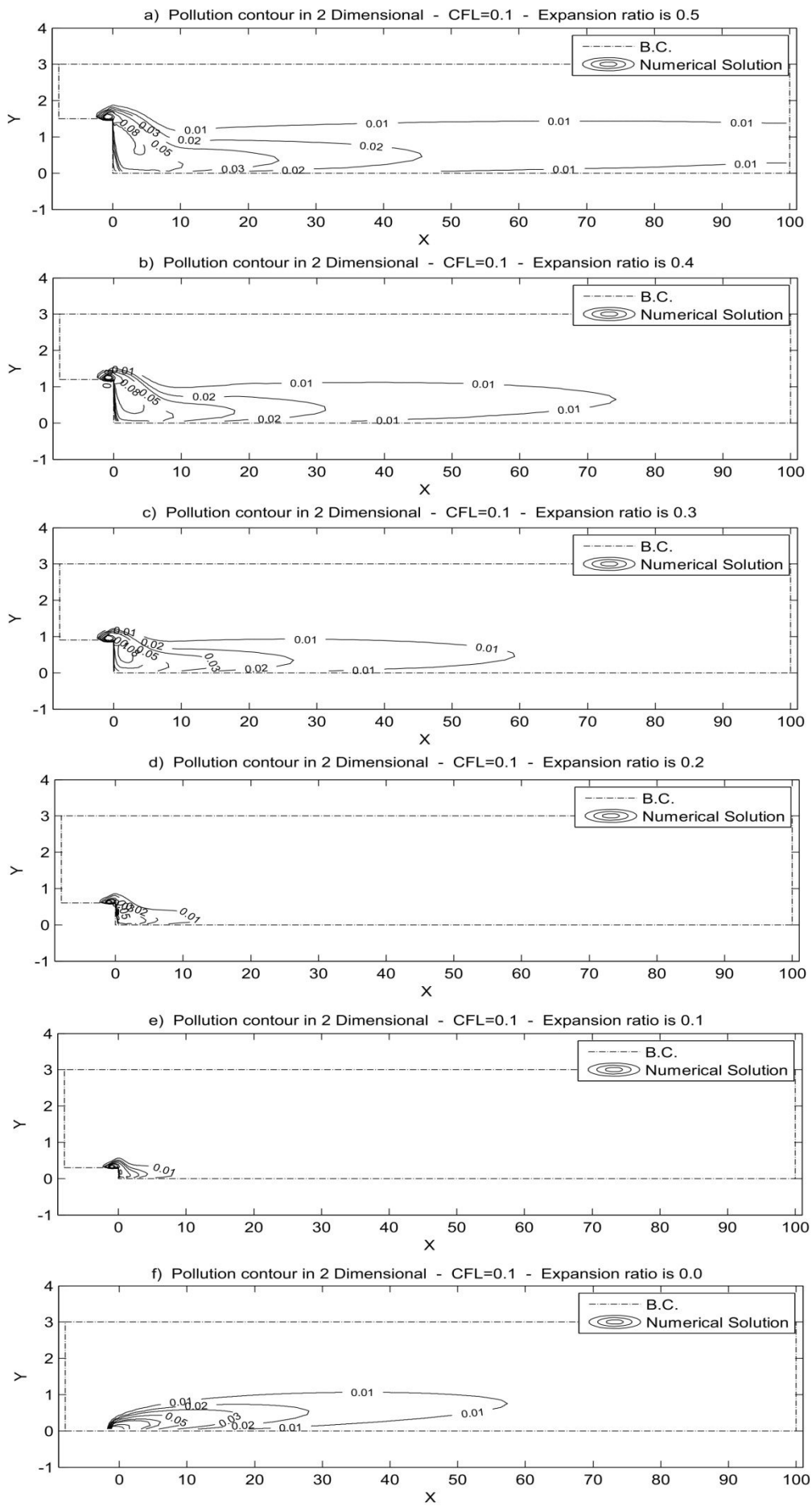
۵-۶-۲ Case B ورود آلودگی از کنار ساحل سمت بازشدگی، قبل از بازشدگی :

شکل (۸-۵) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case B را در حالت نسبت بازشدگی ۰/۵ نمایش می دهد. در شکل (۹-۵) نمودار های توزیع آلودگی در حالت Case B ترسیم شده است.

یادآوری می شود که ورود آلودگی از کنار ساحل سمت بازشدگی، قبل از بازشدگی انجام می شود.

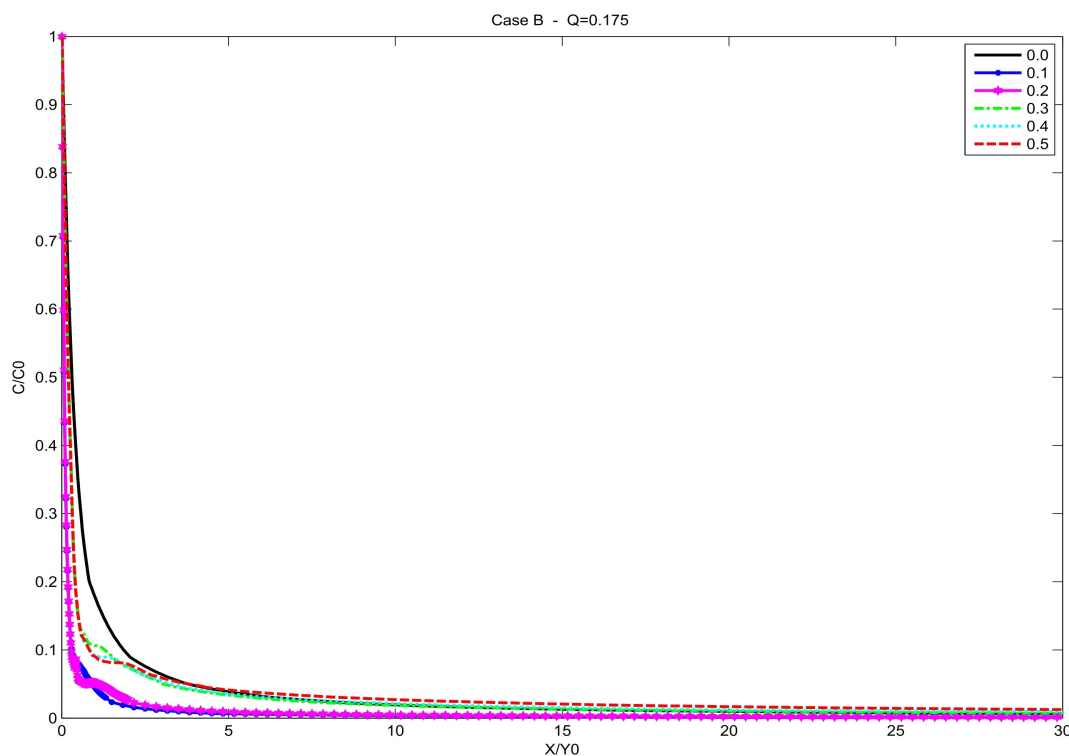


شکل (۸-۵) موقعیت ورود آلودگی Case B



شکل (۵-۹) توزیع آلودگی در حالت Case B

چنانچه همانند مورد قبل نمودار یک بعدی حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول نسبی کانال رسم نماییم، آنگاه می توان حالات مختلف بازشدگی را با یکدیگر مقایسه کرد. شکل (۵-۱۰) این نمودار را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۰) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵

از شکل (۵-۱۰) استنباط می شود که تقریباً در همه حالات، بازشدگی تأثیر مثبت داشته و باعث کاهش طول L' شده است. در حالت ۰/۲ و به خصوص ۰/۱ نتایج مطلوبی حاصل شده است.

به عنوان مثال چنانچه غلظت مجاز ۰/۱ غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از ۵/۵ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می رسیم، حال آنکه در کانالی با نسبت بازشدگی تنها ۰/۱ پس از ۰/۸ متر به حد مجاز خواهیم رسید.

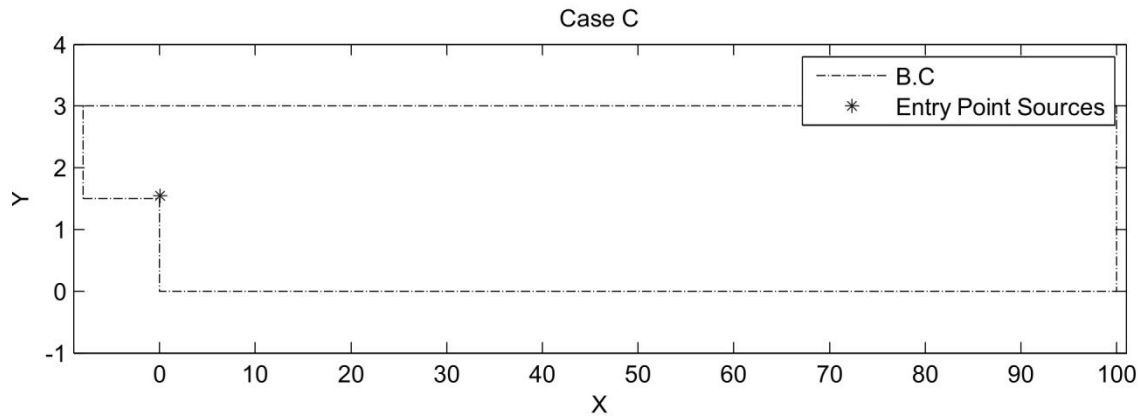
نکته قابل توجه دیگر موقعیت نقطه ورود آلودگی است. در این حالت در کنار ساحل و در حالت قبل در وسط عرض کانال بود. واضح است نتایج در حالت اخیر بسیار از حالت قبلی بهتر شده است.

۵-۶-۳ Case C ورود آلودگی در نقطه شروع بازشدگی:

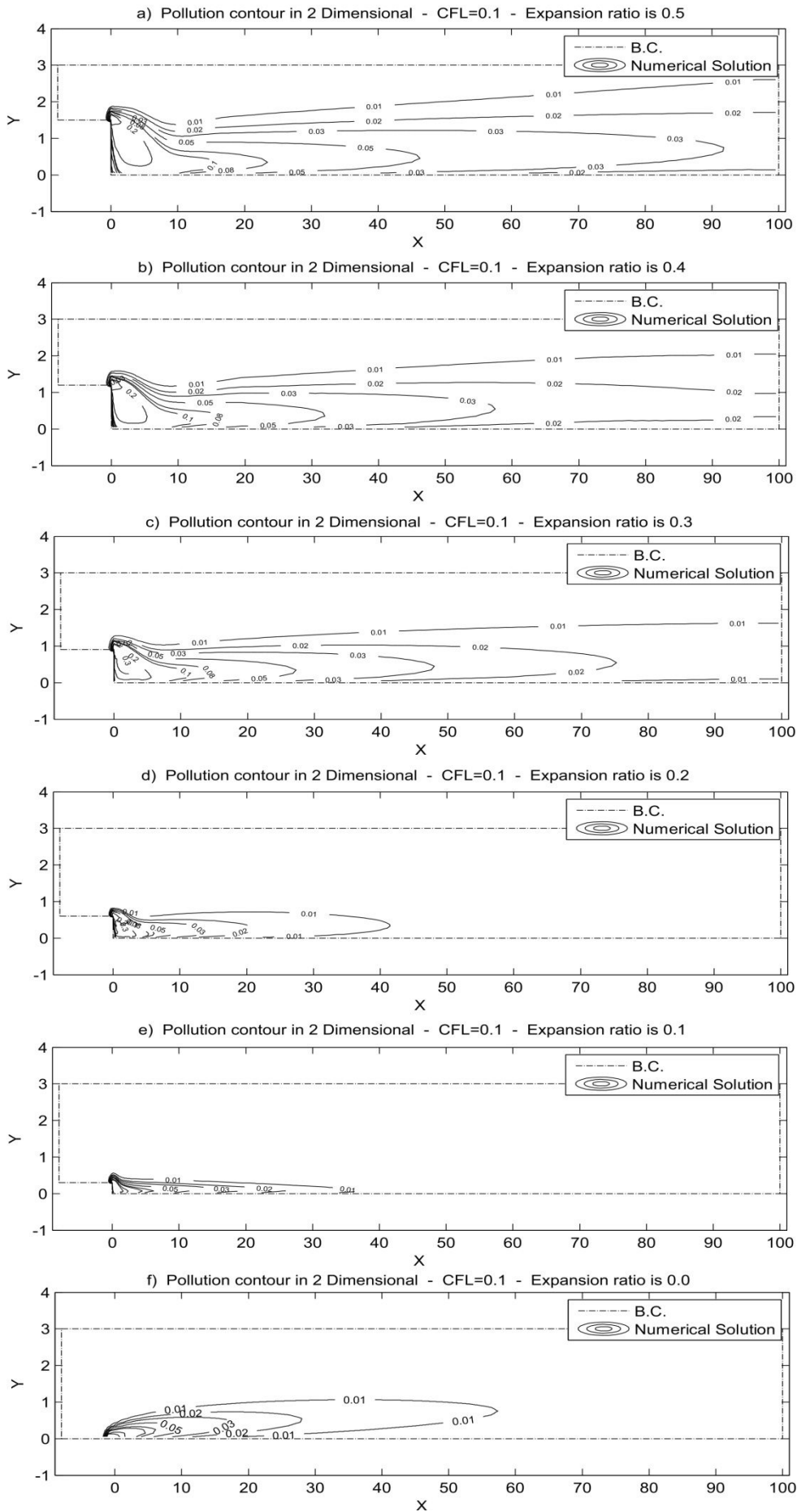
شکل (۵-۱۱) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case C را در حالت نسبت بازشدگی ۰/۵ نمایش می دهد.

در شکل (۵-۱۲) نمودار های توزیع آلودگی در حالت Case C ترسیم شده است.

یاد آوری می شود که ورود آلودگی در نقطه شروع بازشدگی می باشد.

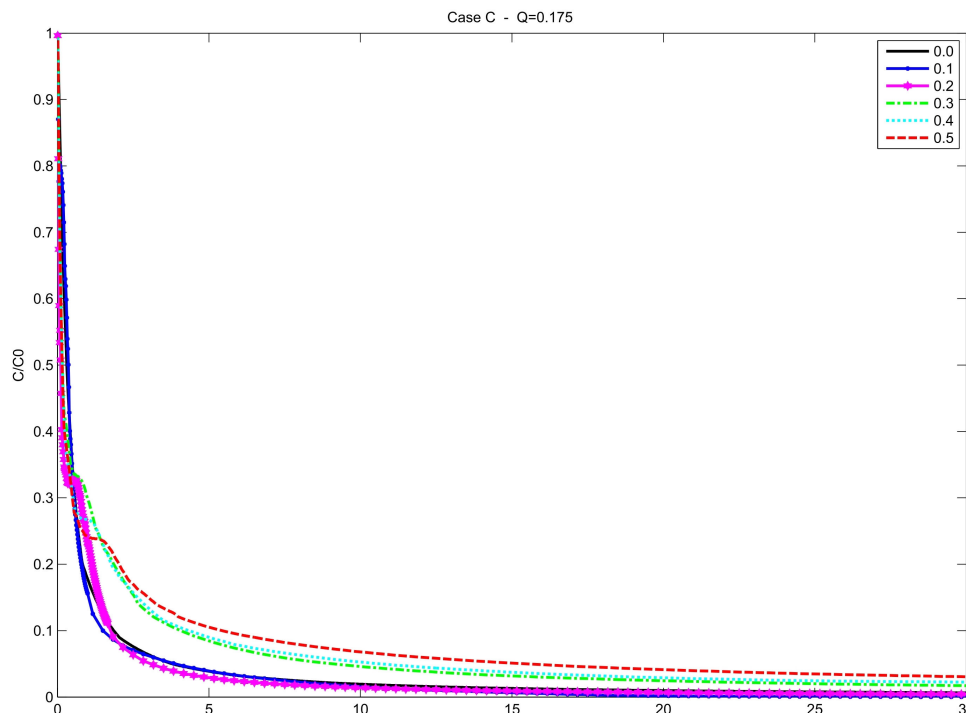


شکل (۵-۱۱) موقعیت ورود آلودگی Case C



شکل (۵-۱۲) توزیع آلودگی در حالت Case C

شکل (۵-۱۳) نمودار یک حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول نسبی کانال، برای حالات مختلف بازشدگی نشان می دهد



شکل (۵-۱۳) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال ، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵

در حالت ۰/۲ و ۰/۱، نتایج تاثیر مثبت و در سایر حالات تاثیر منفی بازشدگی ایجاد شده است . به طور کلی نقطه ورود آلودگی شروع بازشدگی (Case C) نسبت به نقطه ورود آلودگی از کنار ساحل سمت بازشدگی، قبل از بازشدگی (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 هر چقدر آلودگی بیشتر به درون گردابه فرو برود نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

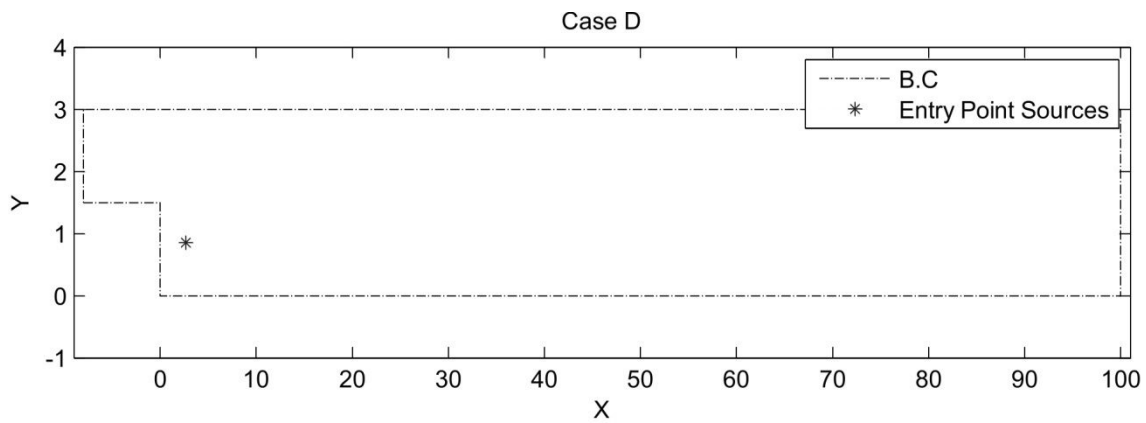
در این حالت نیز به عنوان مثال اگر غلظت مجاز ۰/۱ غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از ۵/۵ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می رسیم، حال آنکه در کانالی با نسبت بازشدگی تنها ۰/۱ پس از ۴/۵ متر به حد مجاز خواهیم رسید.

۵-۶-۴ Case D ورود آلودگی در مرکز گردابه:

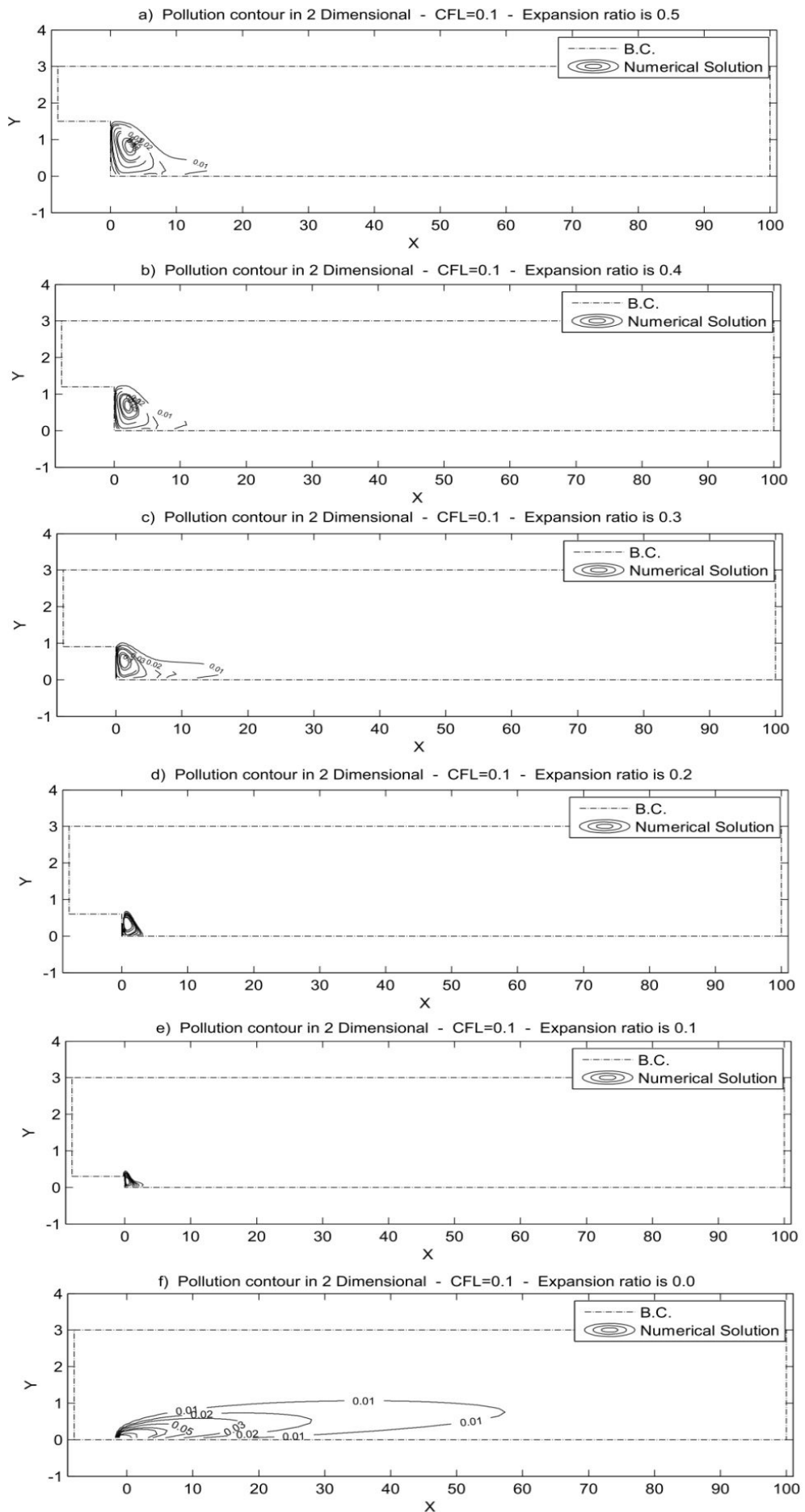
شکل (۵-۱۴) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case D را در حالت نسبت بازشدگی ۰/۵ نمایش می دهد.

در شکل (۵-۱۵) نمودارهای توزیع آلودگی در حالت Case D ترسیم شده است.

یاد آوری می شود که ورود آلودگی در مرکز گردابه (تعیین مرکز گردابه با توجه به نمودارهای سرعت جریان در هر حالت، جداگانه انتخاب شده است.) می باشد.

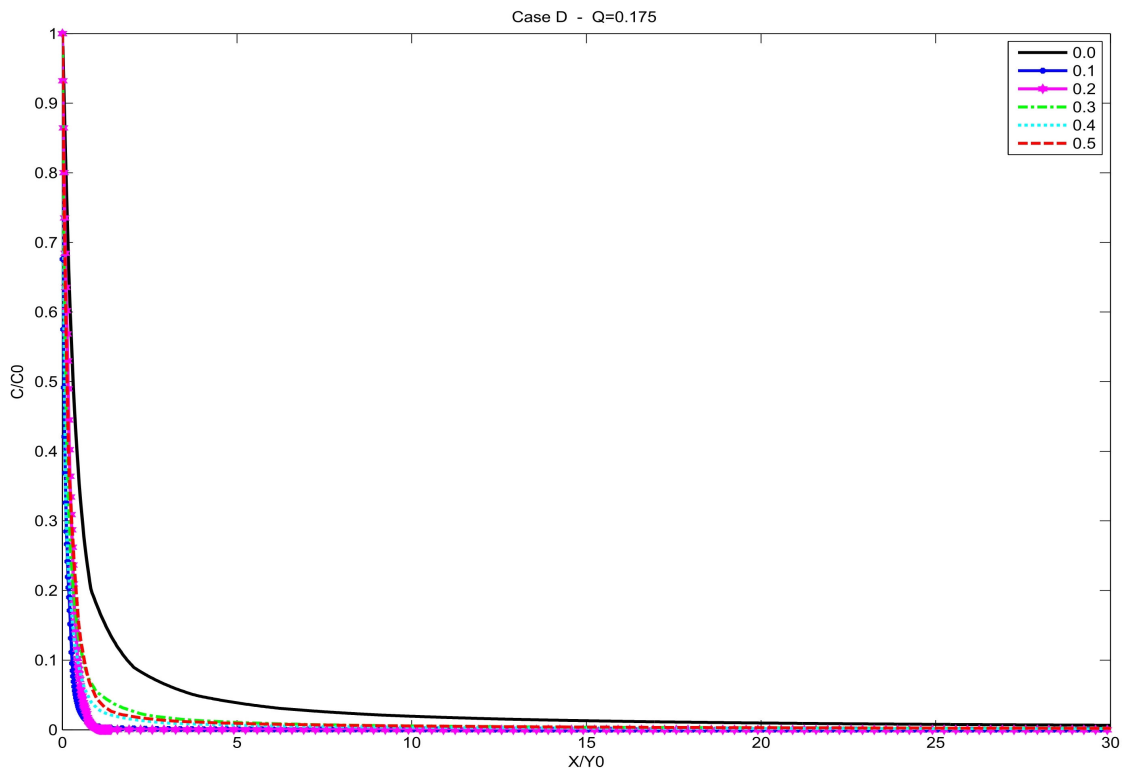


شکل (۵-۱۴) موقعیت ورود آلودگی Case D



شکل (۵-۱۵) توزیع آلودگی در حالت Case D

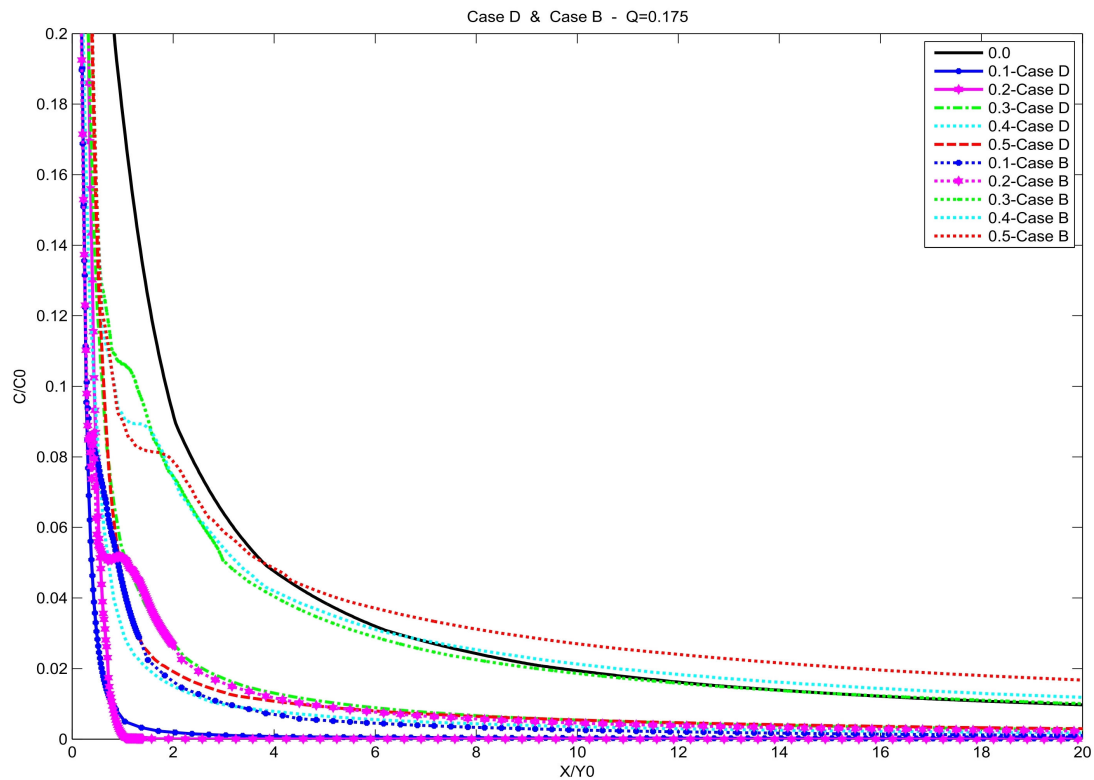
شکل (۵-۱۶) نمودار یک حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول نسبی کانال، برای حالات مختلف بازشدگی نشان می دهد.



شکل (۵-۱۶) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی 0.175 در همه نسبتها، بازشدگی تاثیر مثبت دارد. به طور کلی نقطه ورود آلودگی در مرکز گردابه (Case D) نسبت به سایر حالات نتایج بهتری را ایجاد کرده است. علت این امر، این است که تمام آلودگی به درون گردابه کشیده شده و بوسیله آن به خوبی پخش می شود به عبارت دیگر گردابه مانند یک همزن طبیعی عمل می کند.

در سه حالت Case B، Case C و Case D نمودار نسبت بازشدگی صفر (بدون بازشدگی) یکسان است. در این حالت نیز به عنوان مثال اگر غلظت مجاز 0.1 غلظت اولیه باشد برای این منظور پس از $5/5$ متر در کانال عادی به این مقدار مجاز می رسیم، حال آنکه در کانالی با نسبت بازشدگی تنها 0.1 پس از 0.8 متر به حد مجاز خواهیم رسید.

اختلاف دو حالت Case D و Case B در غلظت های کمتر است. برای مقایسه بهتر، این دو حالت در نمودار شکل (۱۷-۵) ترسیم شده اند. توجه شود که مقیاس نمودار شکل (۱۷-۵) با مقیاس نمودار های مشابه متفاوت است.



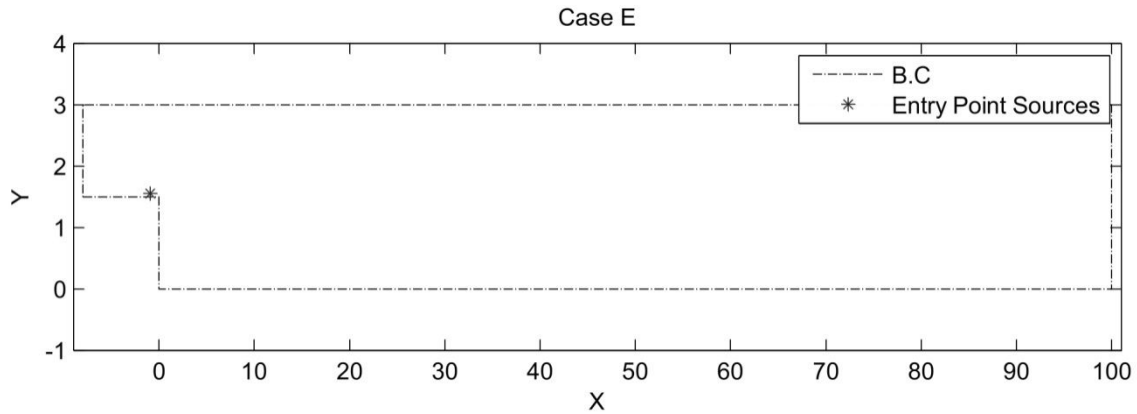
شکل (۱۷-۵) مقایسه دو حالت Case D و Case B در دبی ۰/۱۷۵

از نمودار شکل (۱۷-۵) واضح است که نتایج Case D از سایر حالات مطلوب تر است. لذا در ادامه تغییر شرایط هیدرولیکی (افزایش سرعت) را در حالت اخیر و در حالت ورود آلودگی از کنار ساحل سمت بازشدگی، قبل از بازشدگی (Case B) بررسی خواهیم کرد.

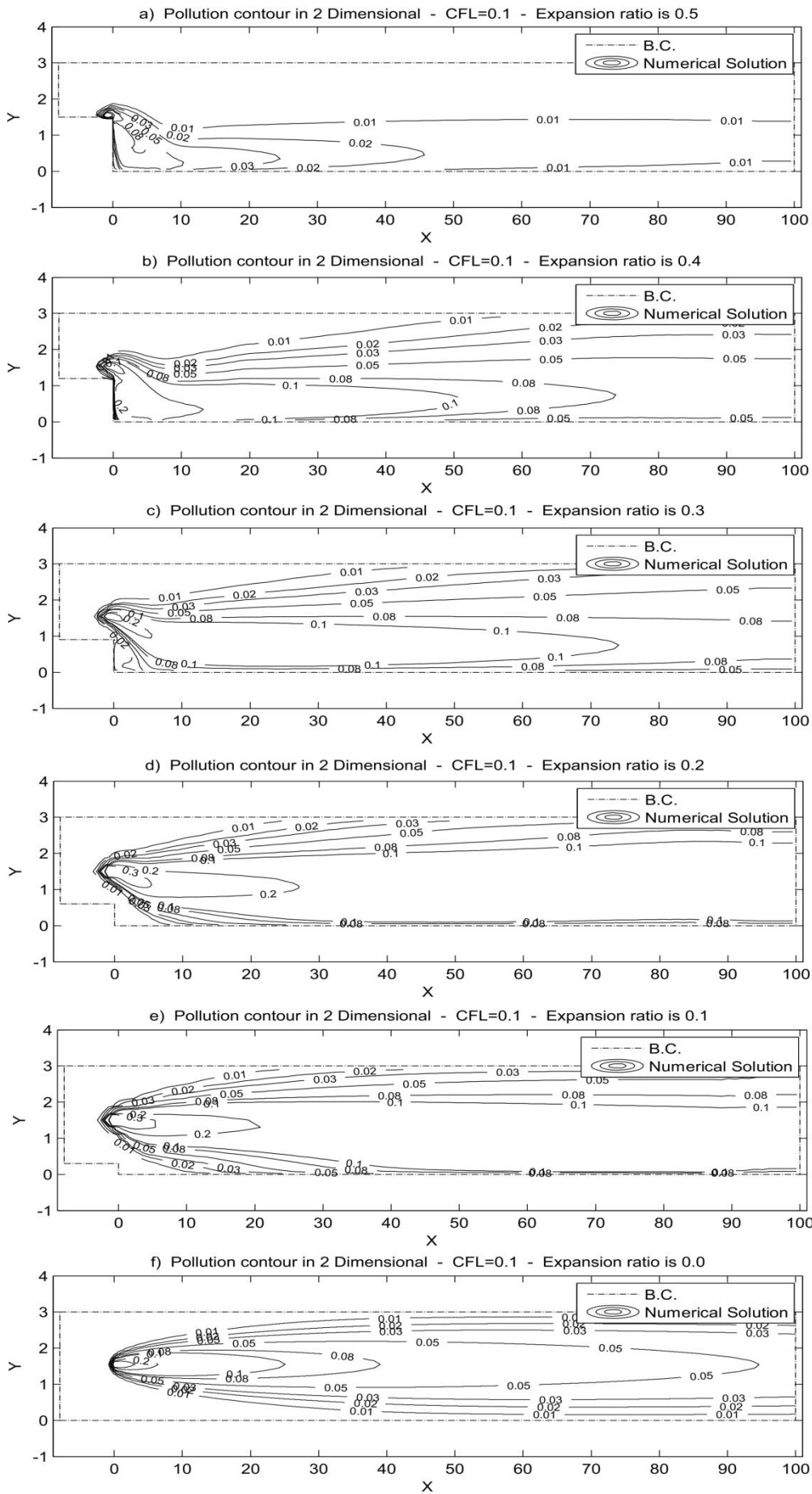
۵-۶-۵ Case E ورود آلودگی در نقطه ثابت:

شکل (۱۸-۵) موقعیت نقطه ورود آلودگی Case E را در حالت نسبت بازشدگی ۰/۵ نمایش می دهد. در شکل (۱۹-۵) نمودار های توزیع آلودگی در حالت Case E ترسیم شده است.

یاد آوری می شود که ورود آلودگی در نقطه ثابت وسط عرض انتهایی کانال (با تغییر در نسبت بازشدگی این نقطه تغییر نمی کند) می باشد.

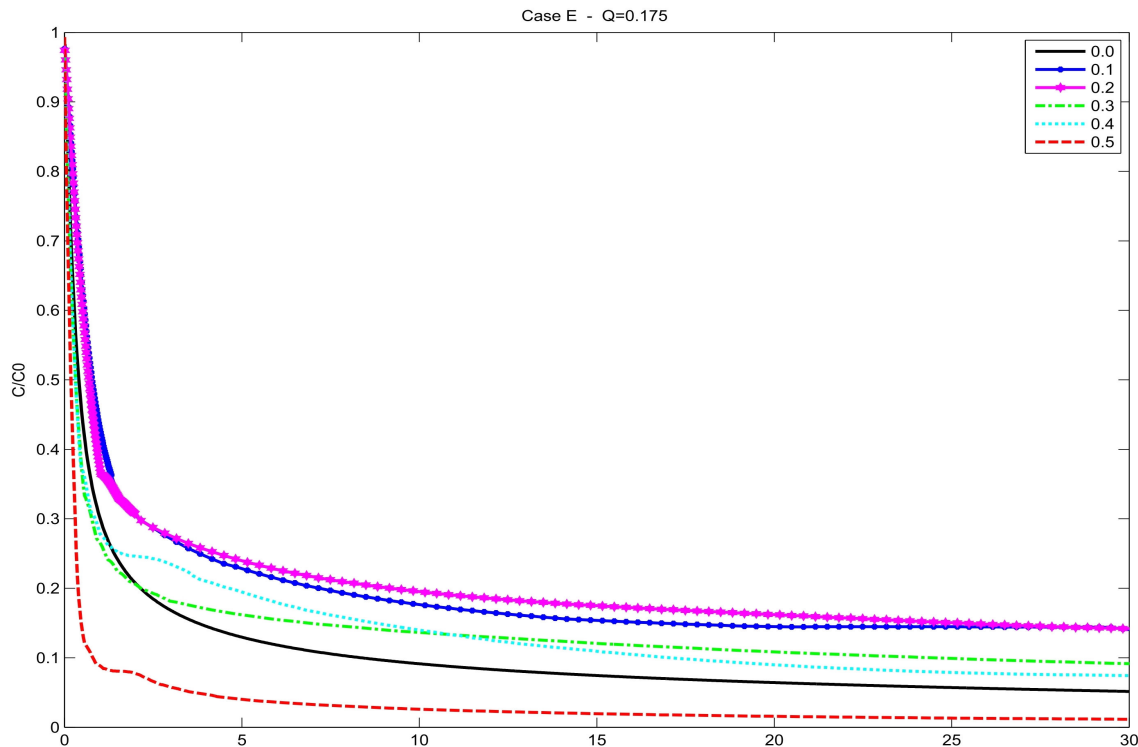


شکل (۱۸-۵) موقعیت ورود آلودگی Case E



شکل (۵-۱۹) توزیع آلودگی در حالت Case E

شکل (۵-۲۰) نمودار یک حداکثر غلظت نسبی آلودگی را در طول نسبی کانال، برای حالات مختلف بازشدگی نشان می دهد.



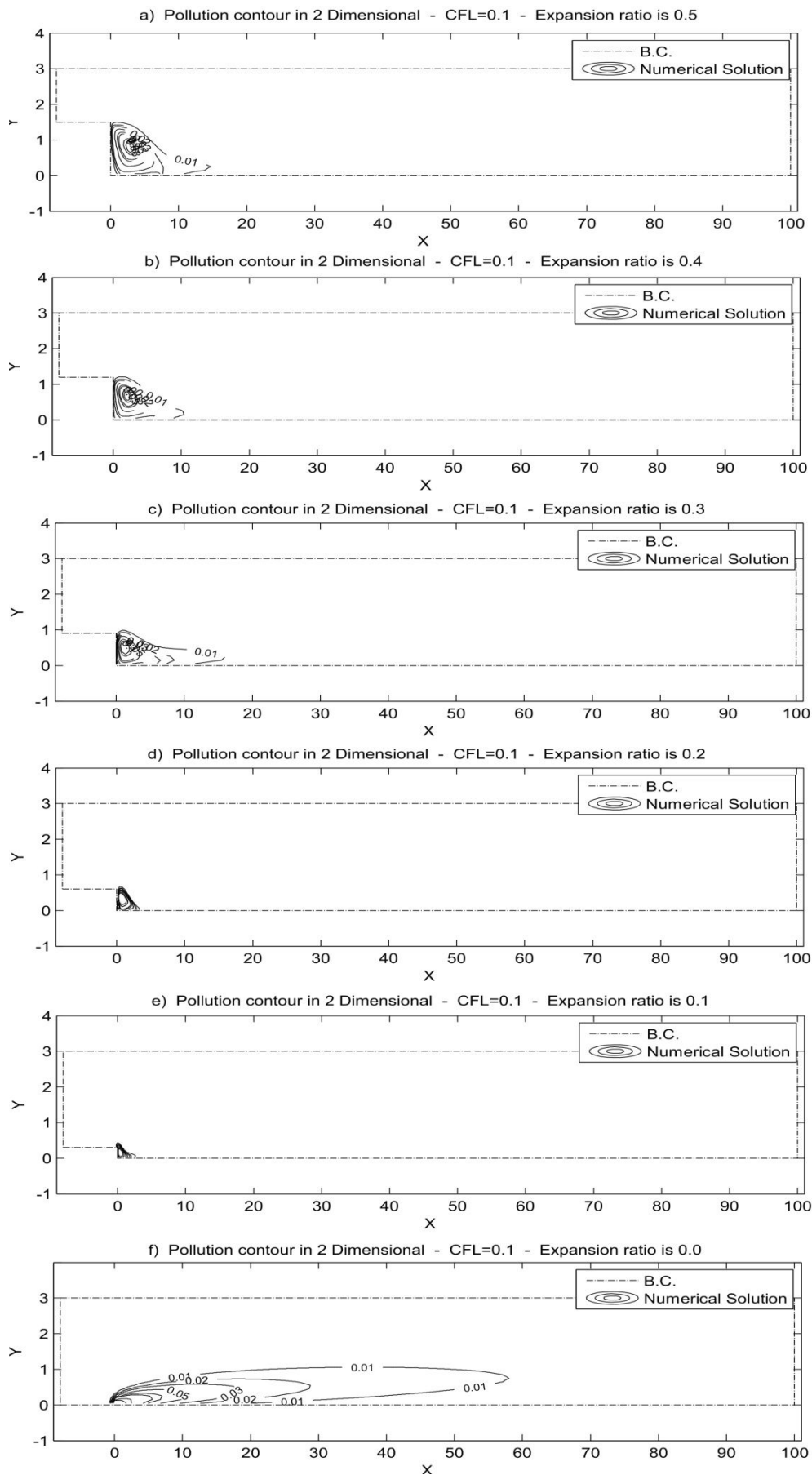
شکل (۵-۲۰) تاثیر نسبت بازشدگی ناگهانی کانال، به توزیع آلودگی در طول نسبی کانال در دبی ۰/۱۷۵

این حالت نتایج مطلوبی بوجود نمی آورد اما می توان تاثیر بازشدگی در حالت نقطه ثابت ورود آلودگی را بررسی کرد. در واقع بوسیله این حالت می توان تأثیرات دراز مدت را بررسی نمود. مثلاً می توان تغییرات توزیع آلودگی را هنگامی که بر اثر رسوب گذاری، باز شدگی در مسیر بوجود می آید و یا بازشدگی، بر اثر فرسایش از بین می رود، بررسی نمود.

۷-۵ تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر توزیع آلودگی:

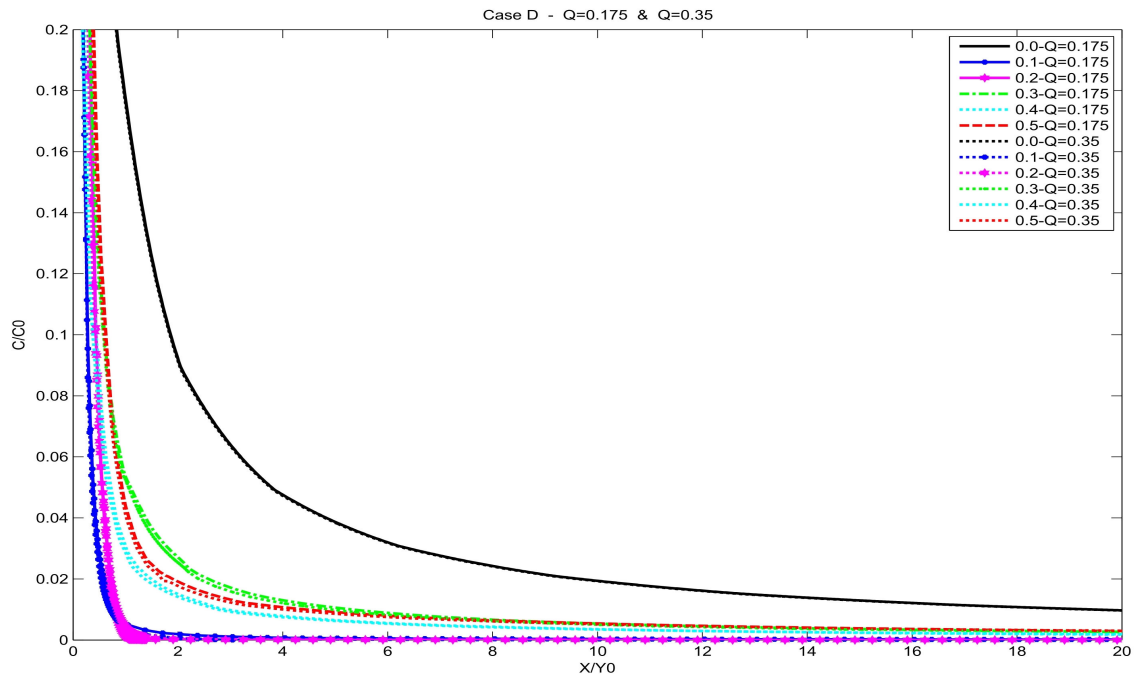
حال که تأثیر نقاط ورود مختلف بر توزیع آلودگی تعیین شد، بهتر است ببینیم تغییر در شرایط هیدرولیکی جریان چه تأثیری بر توزیع آلودگی خواهد گذاشت. برای این منظور دبی عبوری از کانال را با فرض ثابت ماندن ارتفاع آب دو برابر می کنیم (در واقع سرعت را دو برابر کرده ایم). نتایج هیدرولیکی مطابق حالت دوم جدول (۱-۵) حاصل می شود.

در این حالت نقطه ورود آلودگی در مرکز گردابه (Case D) را در نظر می گیریم. در شکل (۲۱-۵) نمودارهای توزیع آلودگی در حالت Case D در دبی ۰/۳۵ ترسیم شده است.

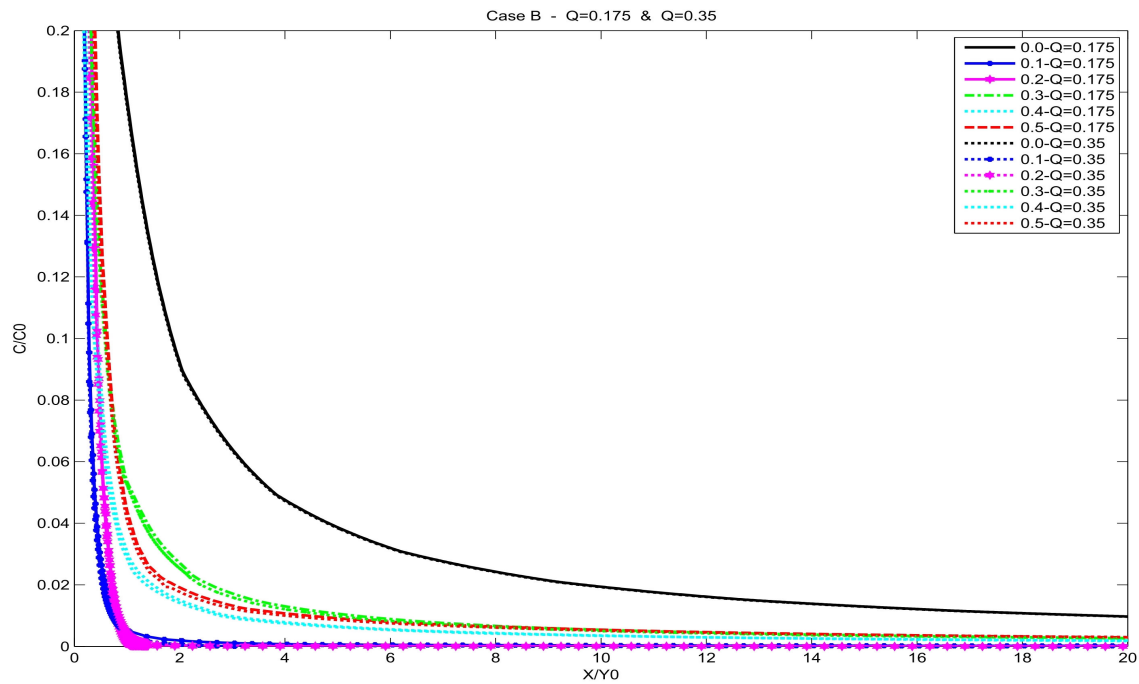


شکل (۵-۲۱) توزیع آلودگی در حالت Case D در دبی ۰/۳۵

برای مقایسه بهتر، دو حالت Case D با دبی های ۰/۱۷۵ و ۰/۳۵ در نمودار شکل (۲۲-۵) و دو حالت Case B در شکل (۲۳-۵) ترسیم شده اند.



شکل (۲۲-۵) مقایسه دو حالت Case D در دبی ۰/۱۷۵ و ۰/۳۵



شکل (۲۳-۵) مقایسه دو حالت Case B در دبی ۰/۱۷۵ و ۰/۳۵

با افزایش سرعت، نمودارها به سمت چپ حرکت می کنند. بدیهی است با توجه به افزایش سرعت جریان، سرعت گردابه نیز افزایش می یابد، در نتیجه اختلاط و پخش بیشتر آلودگی توسط گردابه انجام می شود که این مطلب باعث کم شدن فاصله برای رسیدن به حد مجاز غلظت شده و در نتیجه نمودارها به سمت چپ حرکت می کنند. علاوه بر آن افزایش سرعت، باعث بزرگ شدن ضرایب انتشار نیز می گردد (روابط (۳-۹)) و پدیده انتشار بیش از پدیده انتقال، افزایش می یابد. (نمودار های حالت صفر بدون بازشدگی) مؤید این مطلب است)

ع۔ فصل ششم۔ نتیجہ گیری

۱-۶ مقدمه :

برنامه های CFD تجاری گوناگونی جهت مدل سازی جریان سیال، تعیین غلظت مواد حل شده در آب و توزیع آلودگی وجود دارد که یکی از مهمترین نقایص این برنامه ها، عدم دسترسی به کد برنامه آن ها جهت انجام تحقیقات بیشتر می باشد. در نتیجه، بررسی و مطالعه کد برنامه ای که بتوان با استفاده از آن جریان رودخانه و انتقال و انتشار مواد حل شده در آب را مدل سازی نمود، در بومی سازی این علم و بهبود روند تحقیقات در این زمینه نقش عمده ای ایفا می کند. در این مطالعه تأثیر توزیع آلودگی در مسیر پس از عبور جریان از بازشدگی های ناگهانی مختلف، بوسیله برنامه CFD تهیه شده، بررسی شد. نتایج نشان داد گردابه های ناشی از بازشدگی ناگهانی سبب آشفتگی جریان و اختلاط بهتر آلودگی شده و طول ناحیه آلوده را کاهش می دهد. کاهش طول ناحیه ای از مسیر که در آن آلودگی فراتر از حد مجاز است، یک مصلحت مهندسی است.

۲-۶ نتیجه گیری :

از مطالب فصل قبل نتایج زیر قابل استنباط است :

- چنانچه بخواهیم طول ناحیه آلوده (L') را کاهش دهیم، می توانیم به کمک ایجاد بازشدگی ناگهانی در مسیر به این مهم دست یابیم. البته در این حالت توجه به نقطه ورود آلودگی بسیار پر اهمیت است.
- نقطه ورود آلودگی بسیار مؤثر است، حتی در مسیر های بدون بازشدگی نیز انتخاب موقعیت ورود آلودگی مناسب (چه در طول رودخانه و چه در عرض آن) بسیار پر اهمیت می باشد. به عبارت دیگر حداقل کاری که می توان انجام داد تا سبب بهبود فرآیند توزیع آلودگی شود، این است که با بررسی پلان رودخانه، موقعیت های تشکیل گردابه های طبیعی در بستر رودخانه را شناسایی، و آلودگی را از همین نقاط وارد رودخانه نماییم.

استفاده از بازشدگی های ناگهانی با نسبت بازشدگی کم (مانند حالت ۰/۲ یا ۰/۱) مناسب تر است زیرا

- طول ناحیه آلوده بیشتر کاهش می یابد.
- هزینه ساخت بازشدگی کاهش می یابد.

هرچند بازشدگی های ناگهانی باعث کاهش چشمگیر طول ناحیه آلوده می شوند اما به هر حال مشکلاتی از قبیل اثرات تخریبی گردابه، تغییر در اکوسیستم اطراف، افزایش سرعت جریان در قبل از

بازشدگی و در نتیجه شدت یافتن فرسایش بستر رودخانه نیز از جمله مواردی هستند که توجیه پذیری آن ها را نیازمند مطالعات اقتصادی می کند.

۳-۶ پیشنهادات برای پژوهش های بعدی :

مطالب بیان شده در بخش قبل علی رغم مزایای برشمرده، دارای مشکلاتی است که می توان در مطالعات آینده آن ها را رفع نمود :

- نقطه ورود آلودگی در کنار ساحل (و یا نزدیک به آن)، سبب آلودگی خاک و اثرات سوء آن می شود. علاوه بر آن غلظت آلودگی در نقاط ابتدایی در حاشیه ساحل زیاد است، هر چند این طول آلوده زیاد نیست اما به هر حال این مسأله حیات جانوری حاشیه رودخانه را به مخاطره می اندازد.

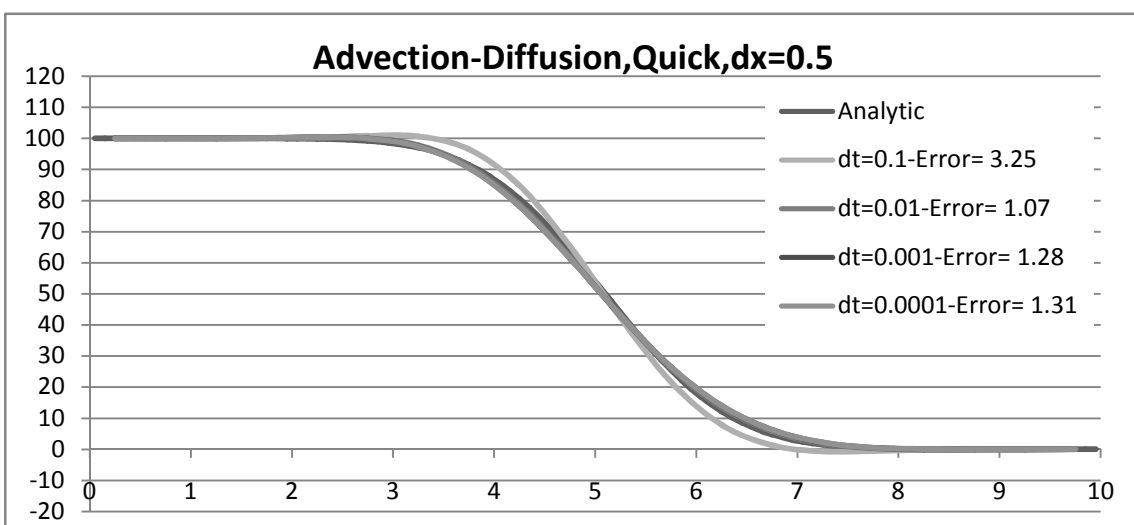
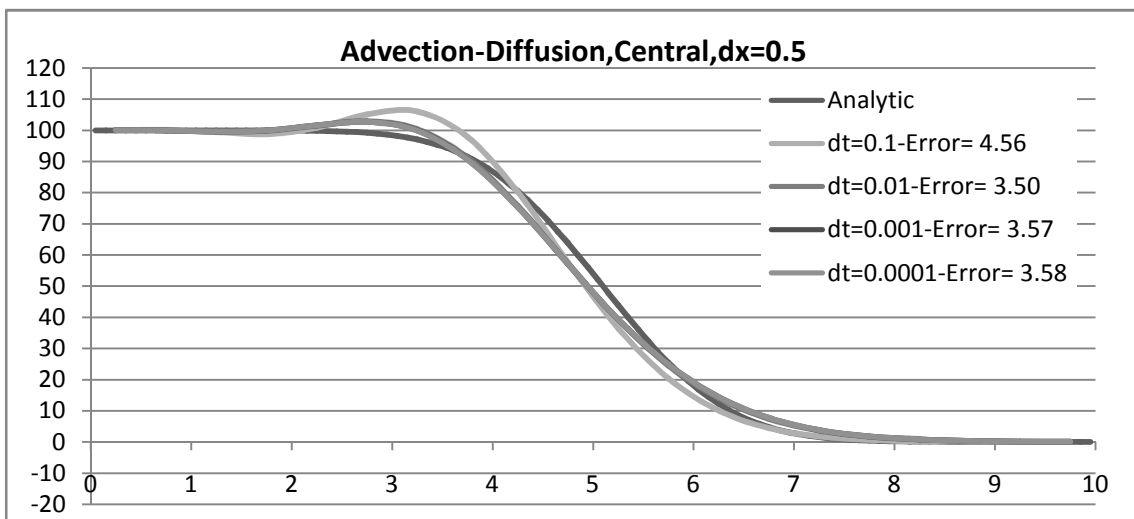
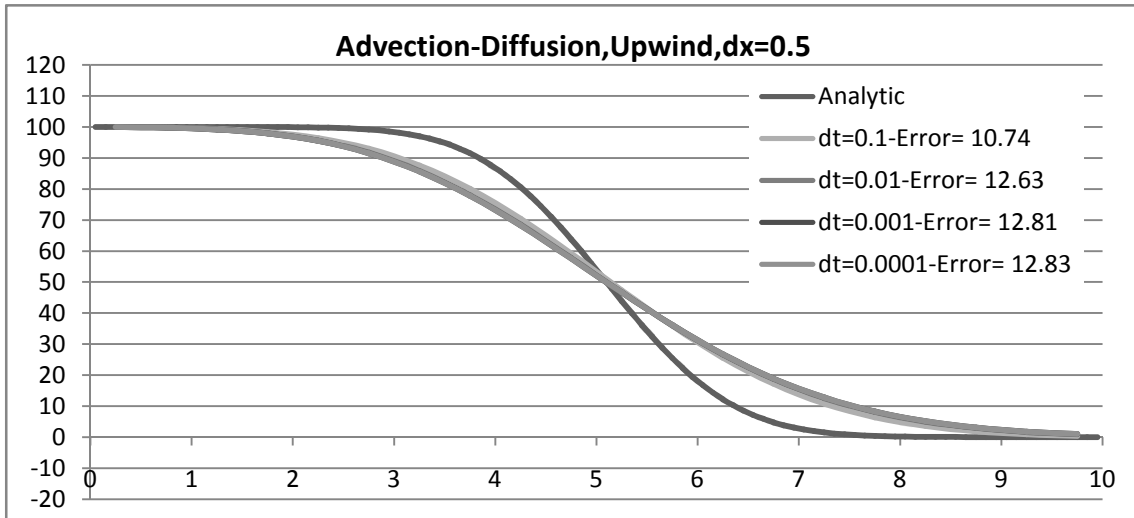
- تغییر در شرایط بازشدگی ناگهانی، مانند تغییر در نسبت بازشدگی و یا تبدیل بازشدگی ناگهانی به تدریجی، بر اثر فرآیند های رسوب گذاری و فرسایش، سبب تغییر در توزیع آلودگی می شود. لذا باید مداوماً شرایط هندسی طرح بررسی گردد.

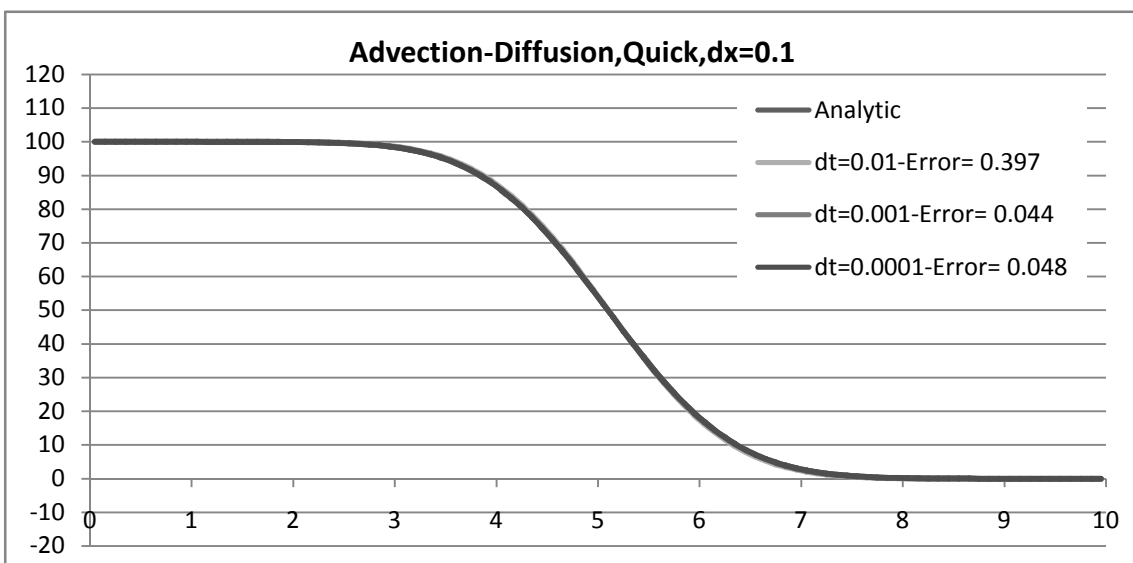
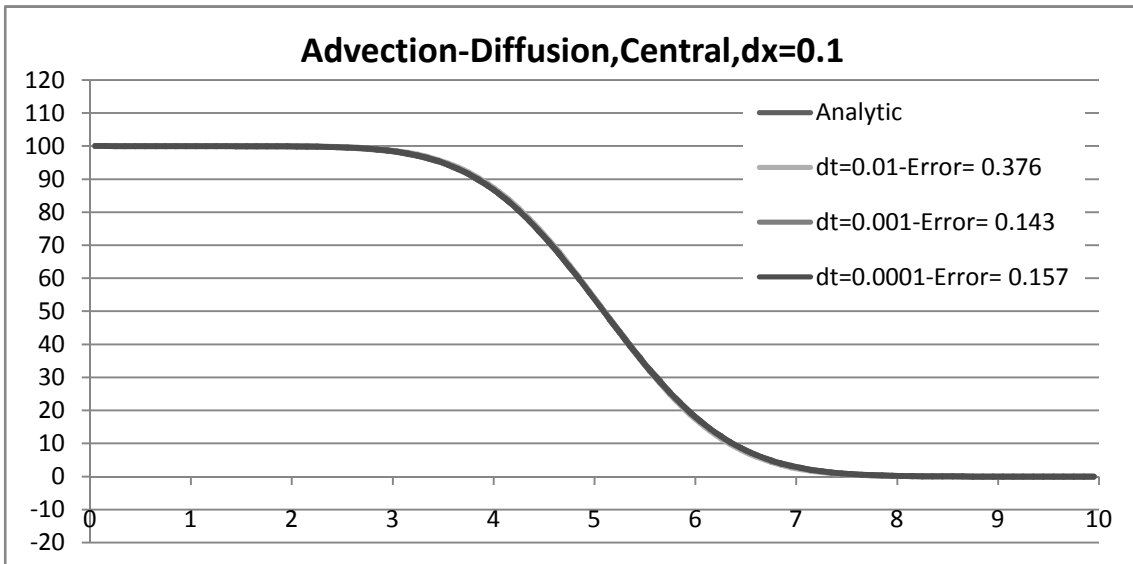
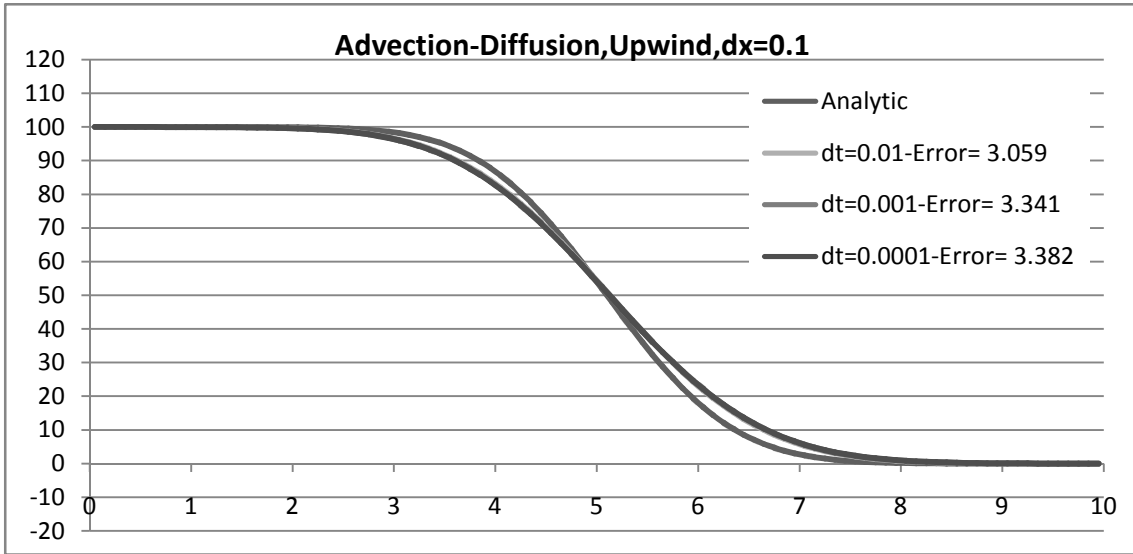
بررسی های انجام شده در این پژوهش بر اساس مدل دو بعدی بود ، در نتیجه تأثیر پارامتر عمق جریان بر توزیع آلودگی نادیده گرفته شد. می توان به کمک مدل سازی توزیع سه بعدی آلودگی، تأثیر این پارامتر را نیز در نظر گرفت. به طور قطع استفاده از واسط گرافیکی جهت ارائه بهتر نتایج و همچنین مدل سازی آسان تر محدوده مطالعاتی در جلب نظر کاربر و درک بهتر مطالب و گزارشات مفید می باشد. لذا می توان با در نظر گرفتن واسط گرافیکی به این مهم دست یافت.

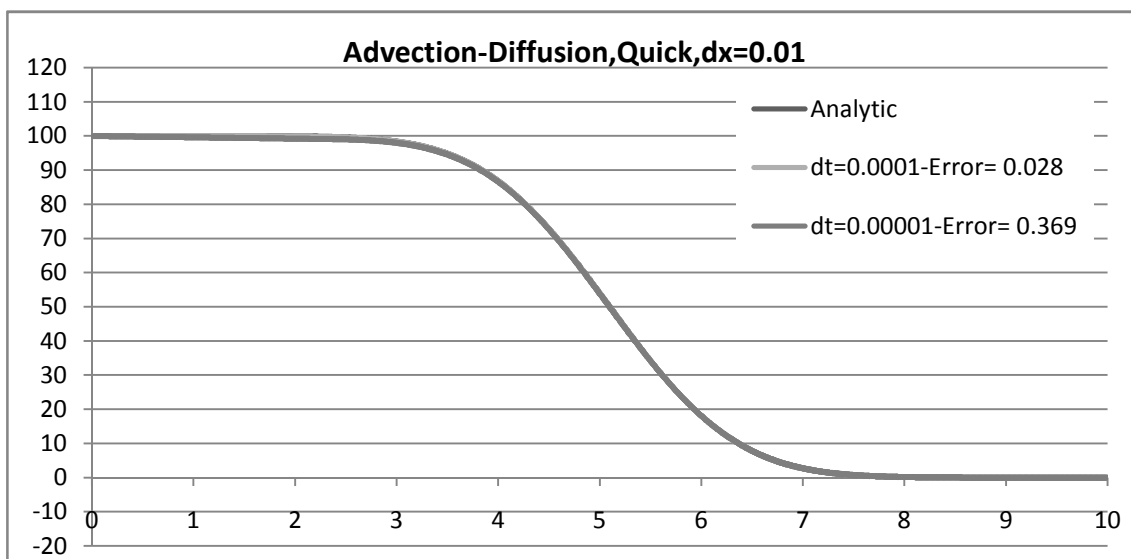
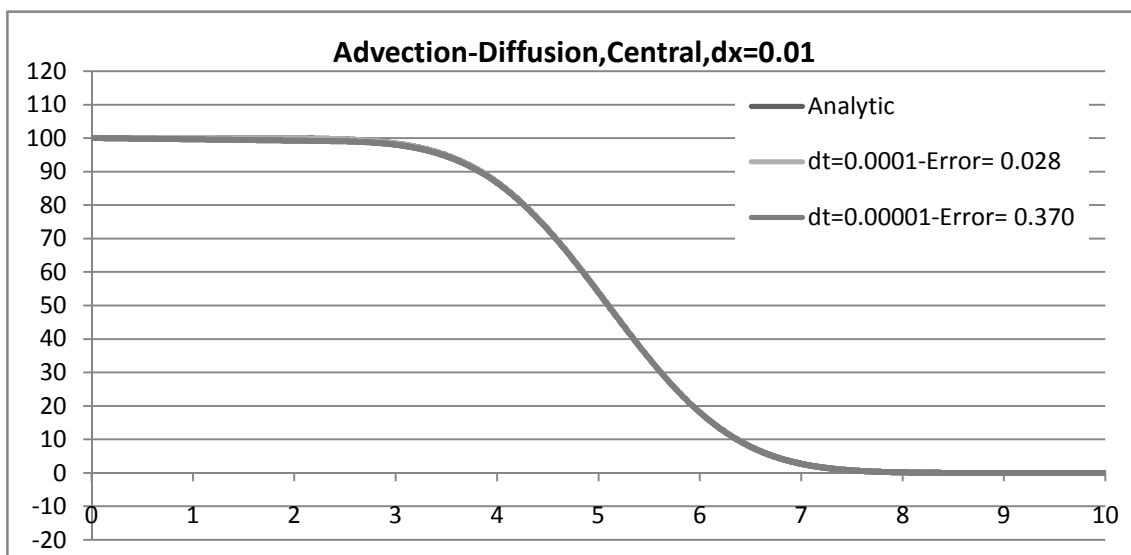
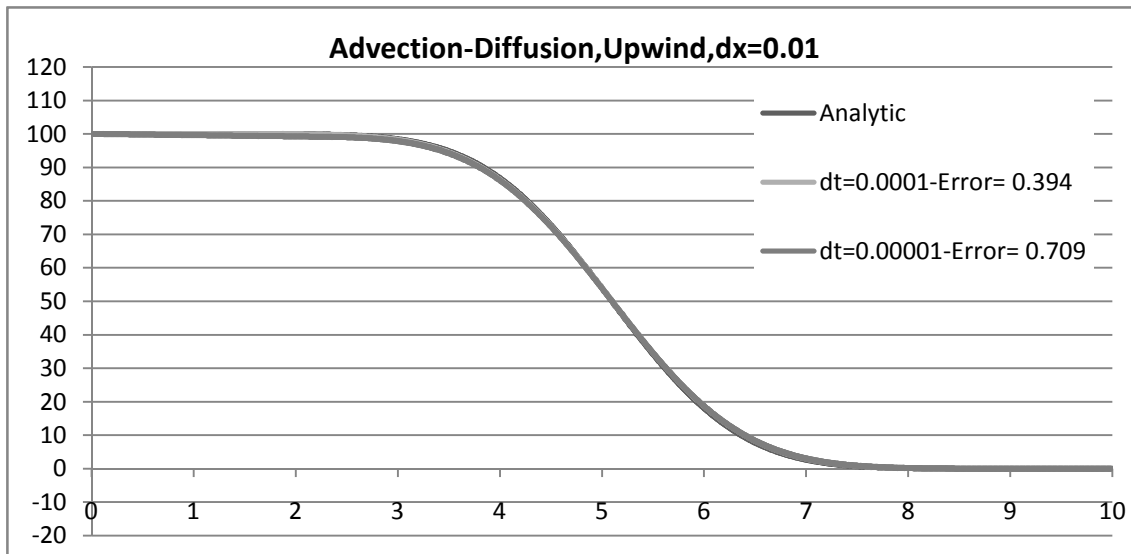
۷- پوست‌ها

۱-۷ پیوست ۱:

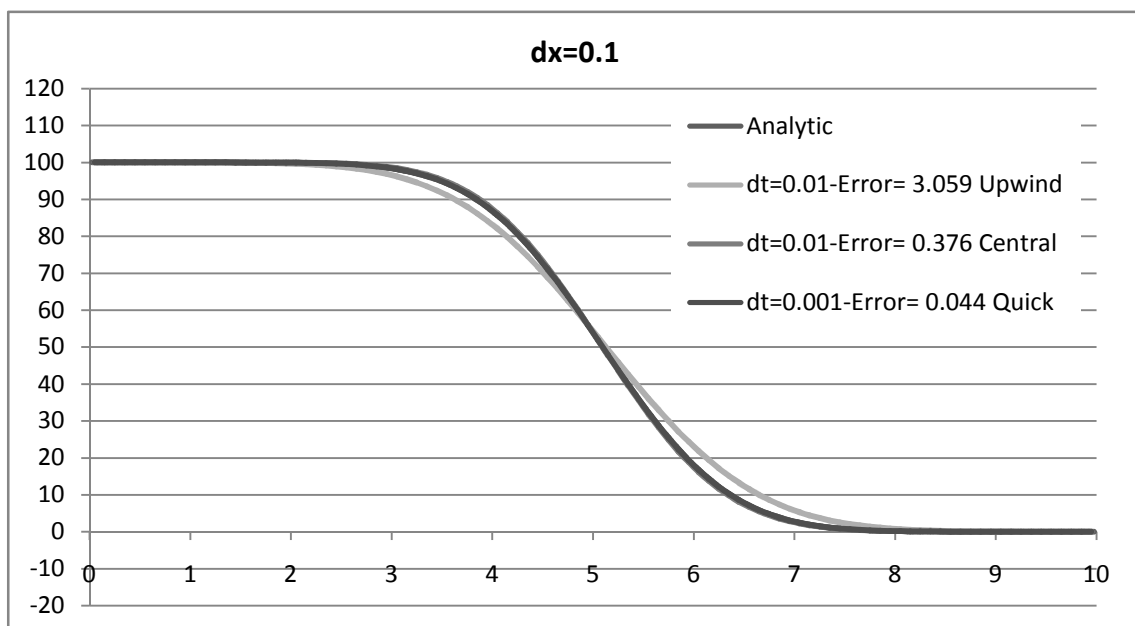
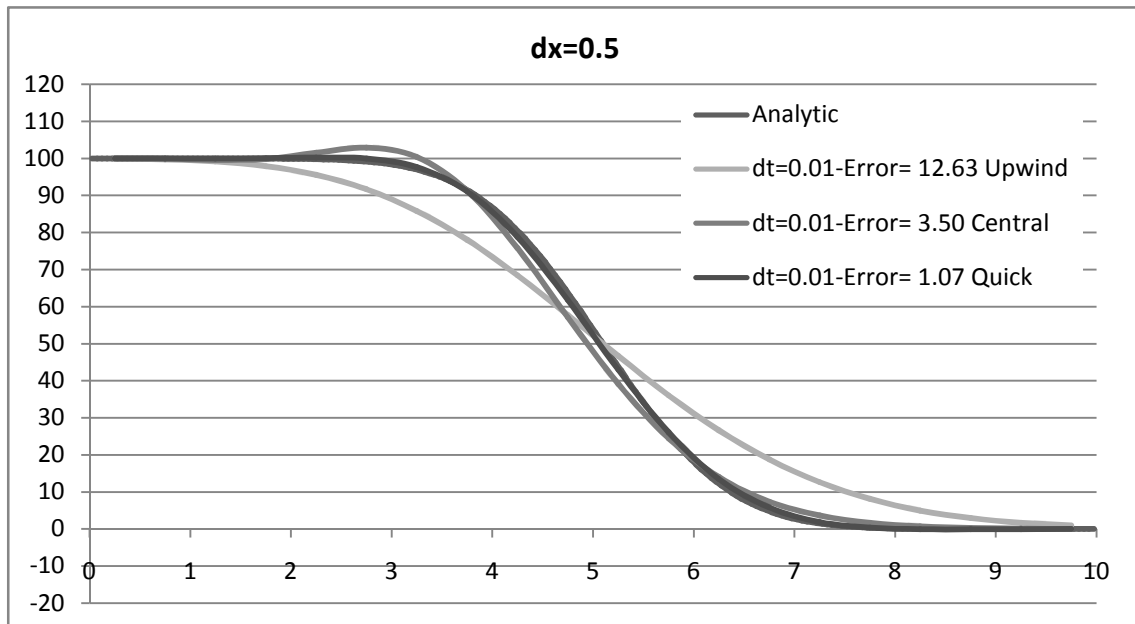
سایر نتایج تست یک بعدی در شکل های زیر نمایش داده شده است.

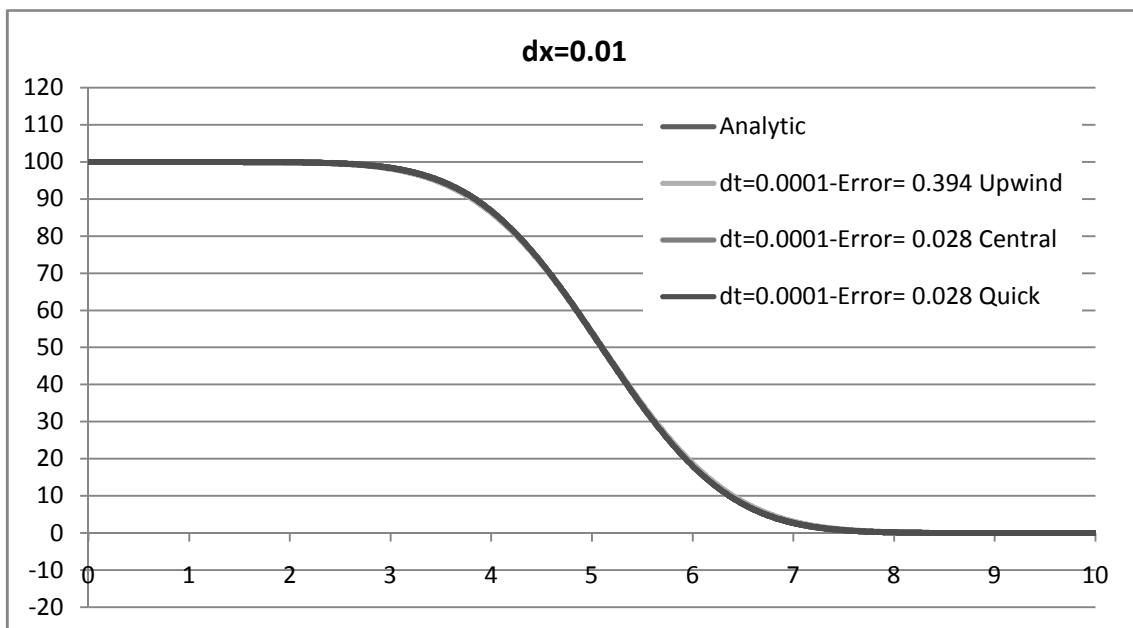
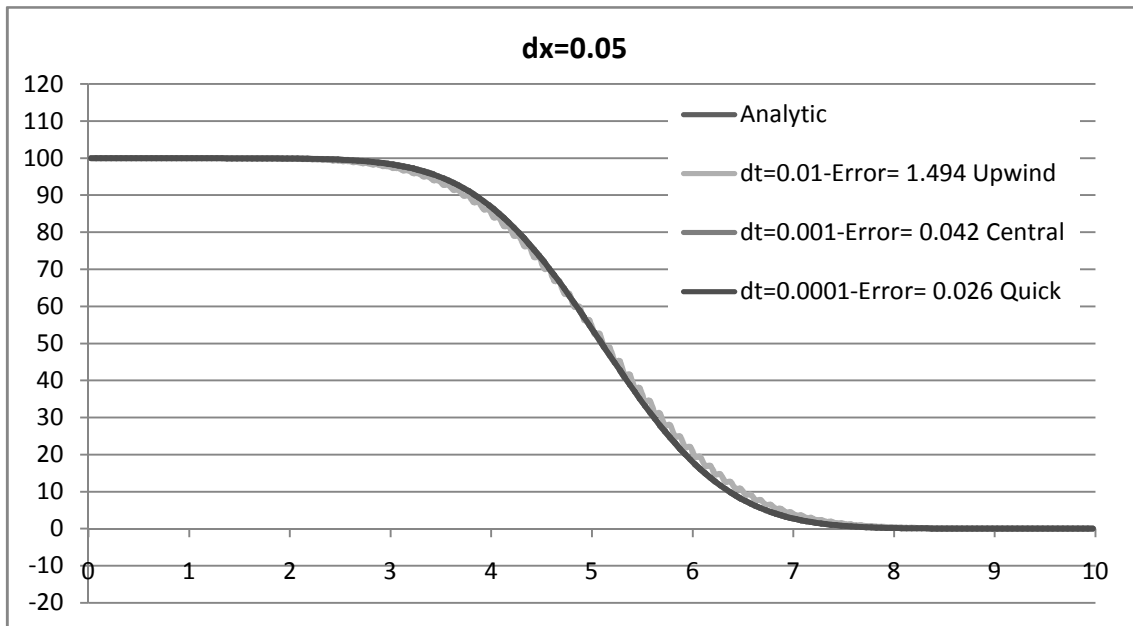






شکل های زیر مقایسه طرح های عددی مختلف با بهترین گام زمانی در یک شبکه خاص را نشان می دهد.





جدول زیر مقدار خطای حالات مختلف را نمایش می دهد.

Advection – Diffusion 1-Dimension				
Method	Order	Δx	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	0.5	1.0	Unstable
			0.5	Unstable
			0.1	10.74
			0.01	12.63
			0.001	12.81
			0.0001	12.83
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	0.5	1.0	Unstable
			0.5	10.83
			0.1	12.43
			0.01	12.79
			0.001	12.82
			0.0001	12.83
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	0.5	1.0	Unstable
			0.5	Unstable
			0.1	4.56
			0.01	3.50
			0.001	3.57
			0.0001	3.58
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	0.5	1.0	4.70
			0.5	3.66
			0.1	3.58
			0.01	3.58
			0.001	3.58
			0.0001	3.58
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	0.5	1.0	Unstable
			0.5	Unstable
			0.1	3.25
			0.01	1.07
			0.001	1.28
			0.0001	1.31

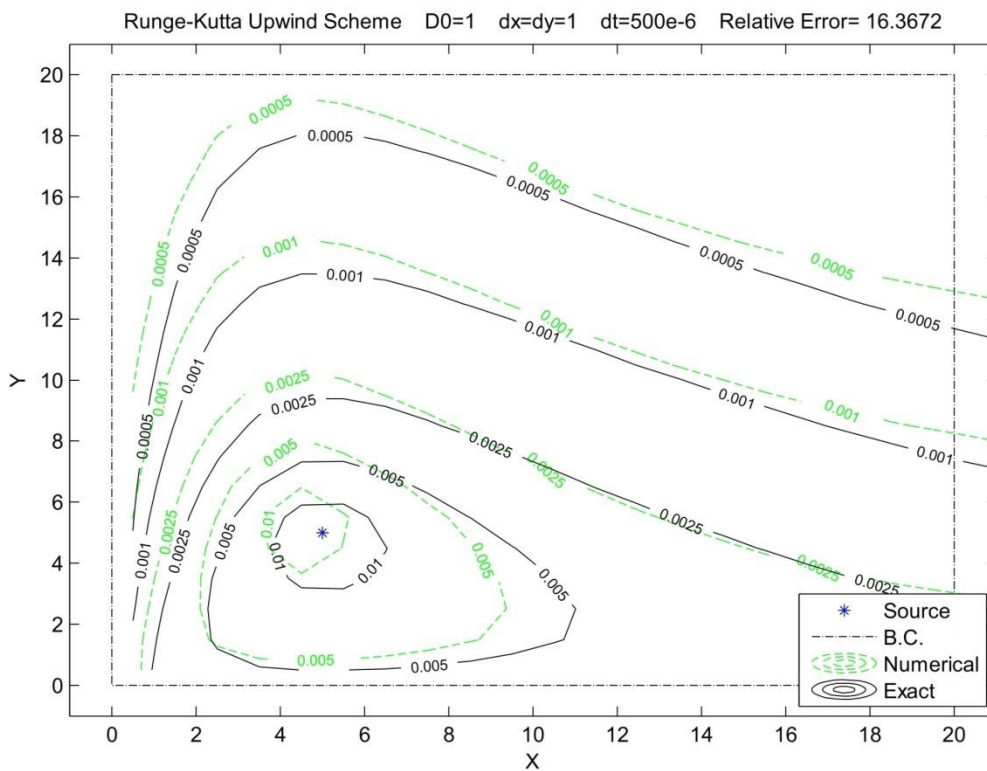
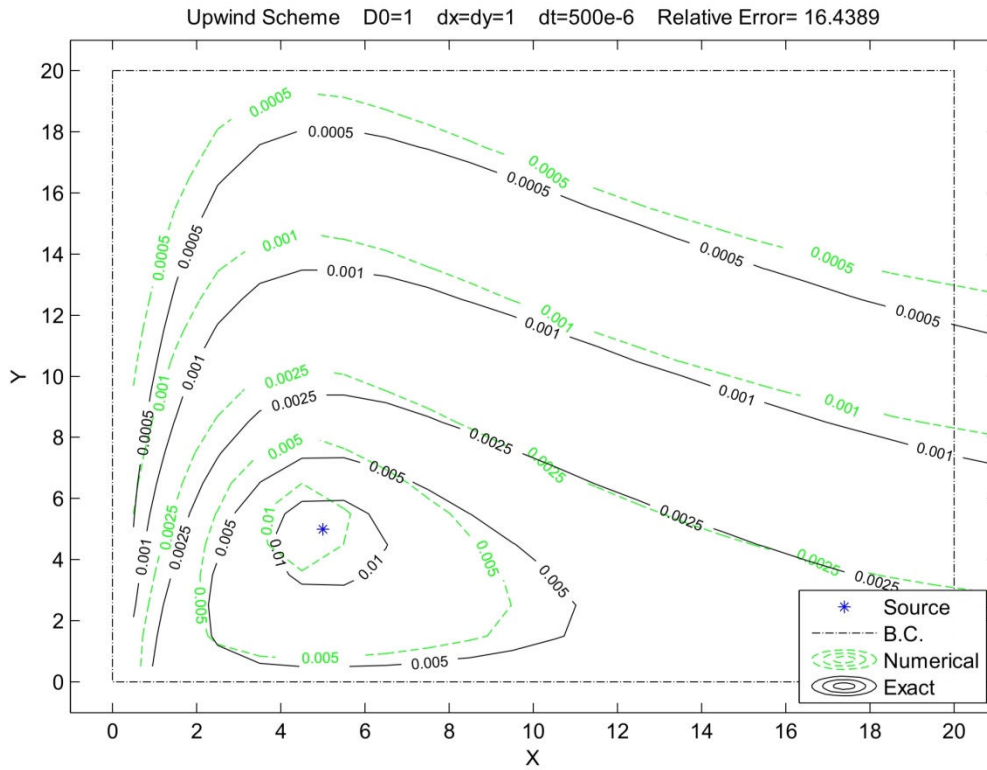
Advection – Diffusion 1-Dimension				
Method	Order	Δx	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	0.1	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.05	Unstable
			0.01	3.059
			0.001	3.341
			0.0001	3.382
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	0.1	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.05	3.061
			0.01	3.310
			0.001	3.367
			0.0001	3.385
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	0.1	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.05	Unstable
			0.01	0.376
			0.001	0.143
			0.0001	0.157
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	0.1	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.05	0.153
			0.01	0.153
			0.001	0.153
			0.0001	0.159
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	0.1	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.05	Unstable
			0.01	0.397
			0.001	0.044
			0.0001	0.048

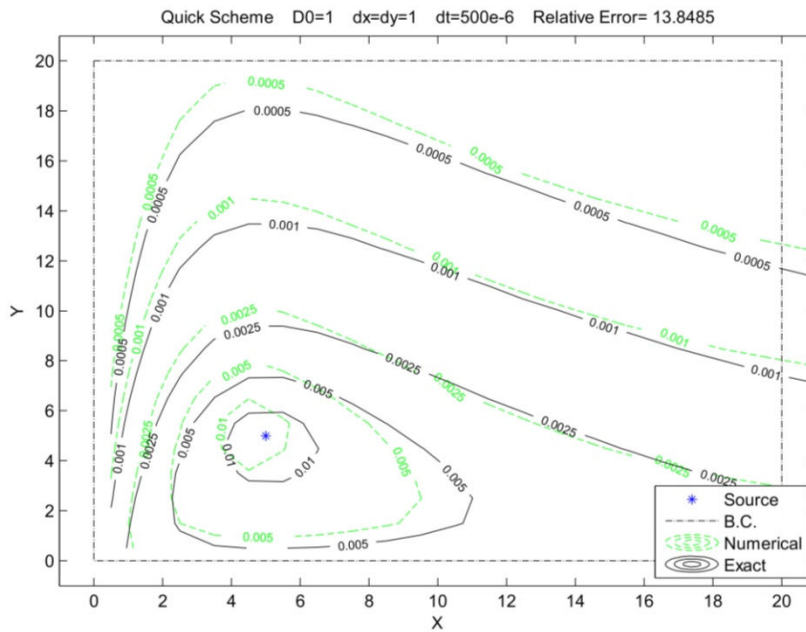
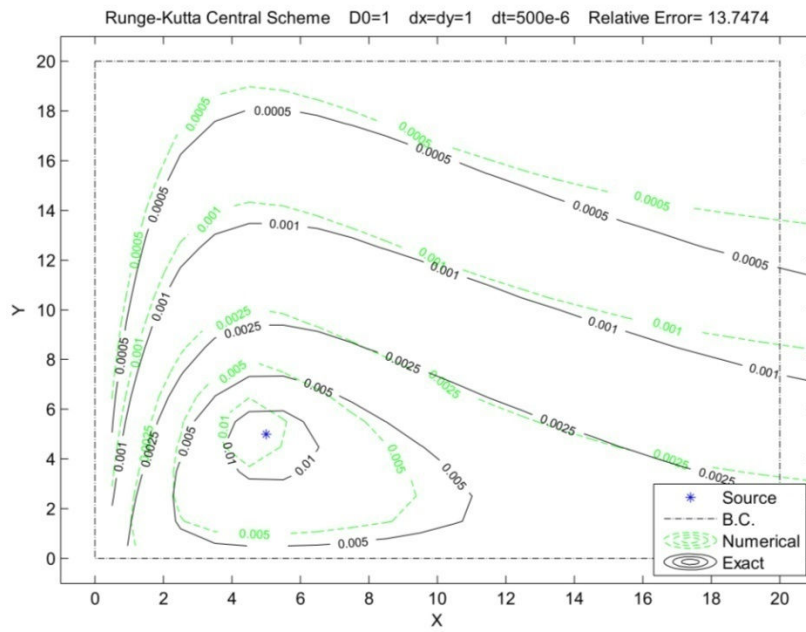
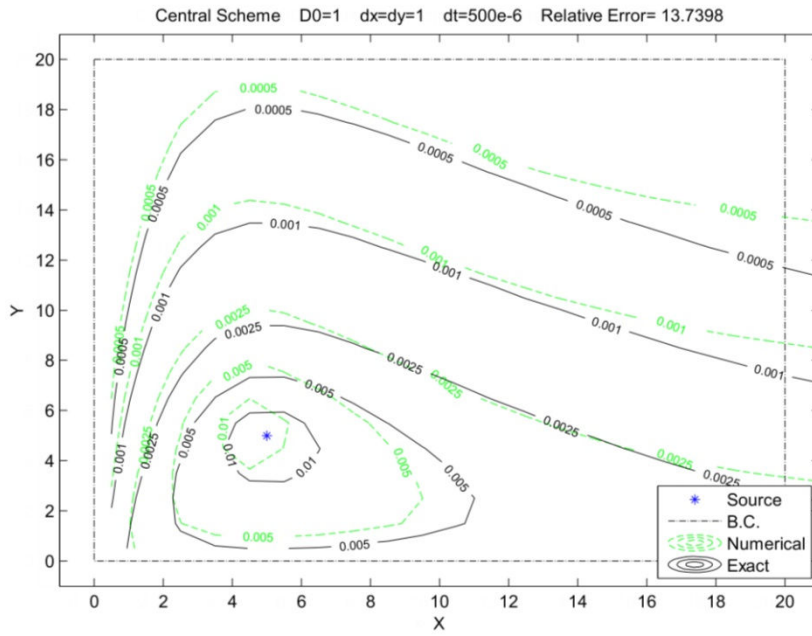
Advection – Diffusion 1-Dimension				
Method	Order	Δx	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	0.05	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.02	Unstable
			0.01	1.494
			0.001	1.748
			0.0001	1.797
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	0.05	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.02	1.648
			0.01	1.715
			0.001	1.776
			0.0001	1.801
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	0.05	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.015	Unstable
			0.01	0.396
			0.001	0.042
			0.0001	0.048
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	0.05	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.015	0.106
			0.01	0.038
			0.001	0.038
			0.0001	0.050
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	0.05	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.02	Unstable
			0.01	0.406
			0.001	0.041
			0.0001	0.026

Advection – Diffusion 1-Dimension				
Method	Order	Δx	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	0.01	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.01	Unstable
			0.001	Unstable
			0.0001	0.394
			0.00001	0.709
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	0.01	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.01	Unstable
			0.001	0.368
			0.0001	0.398
			0.00001	0.711
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	0.01	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.01	Unstable
			0.0005	Unstable
			0.0001	0.028
			0.00001	0.370
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	0.01	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.01	Unstable
			0.0005	0.003
			0.0001	0.028
			0.00001	0.371
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	0.01	0.5	Unstable
			0.1	Unstable
			0.01	Unstable
			0.001	Unstable
			0.0001	0.028
			0.00001	0.369

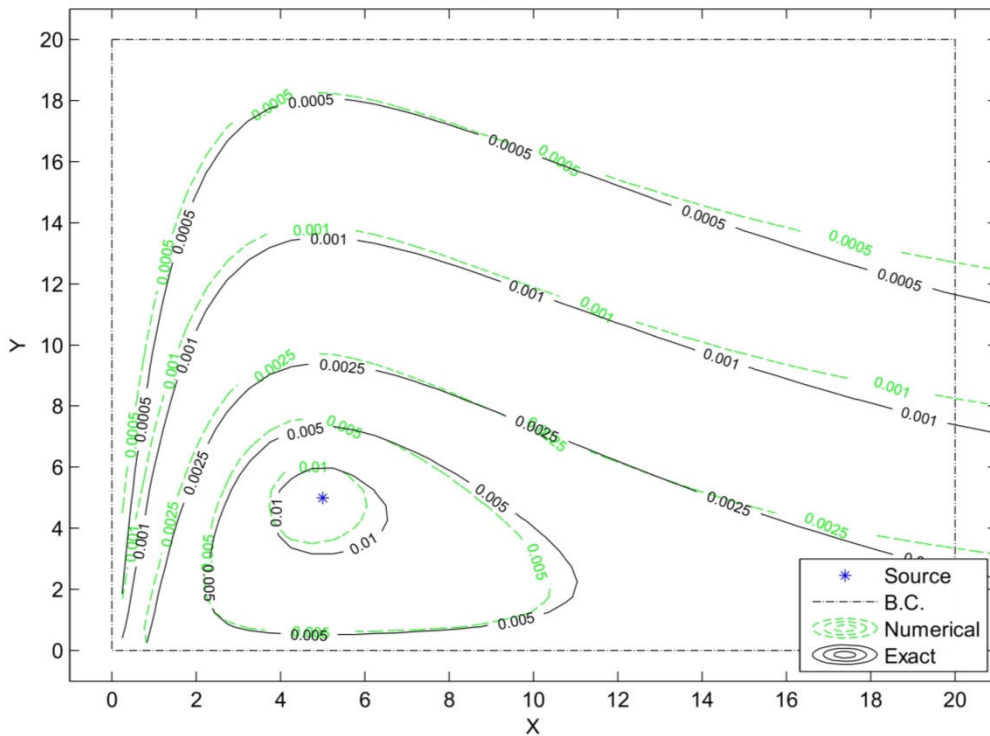
۲-۷ پیوست ۲:

سایر نتایج تست دو بعدی در شکل های زیر نمایش داده شده است.

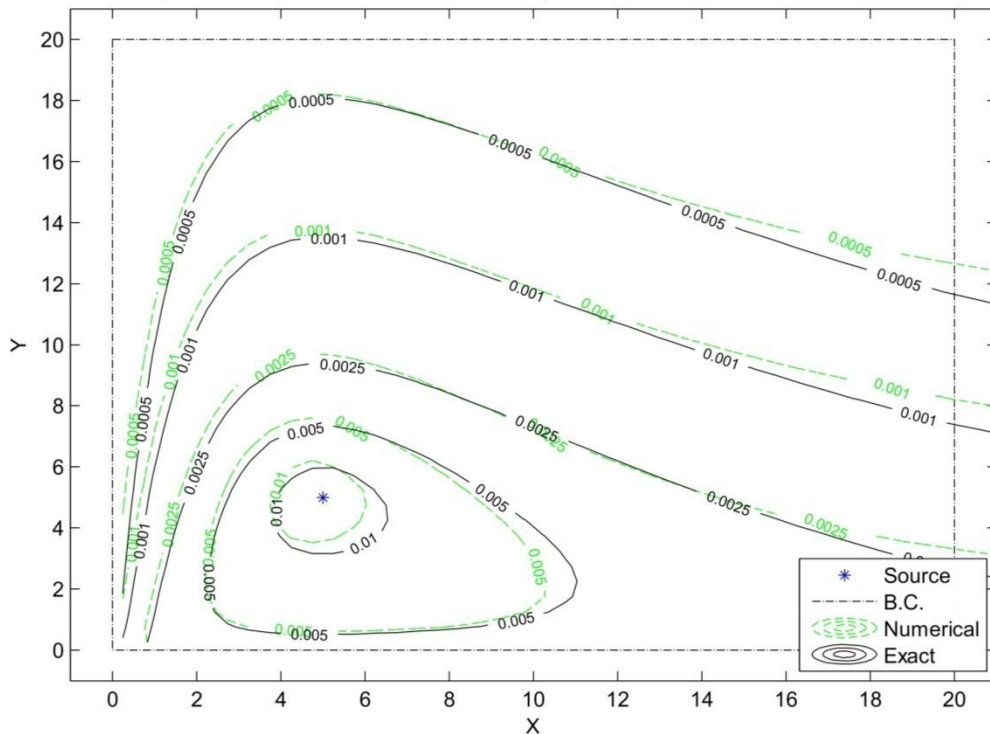


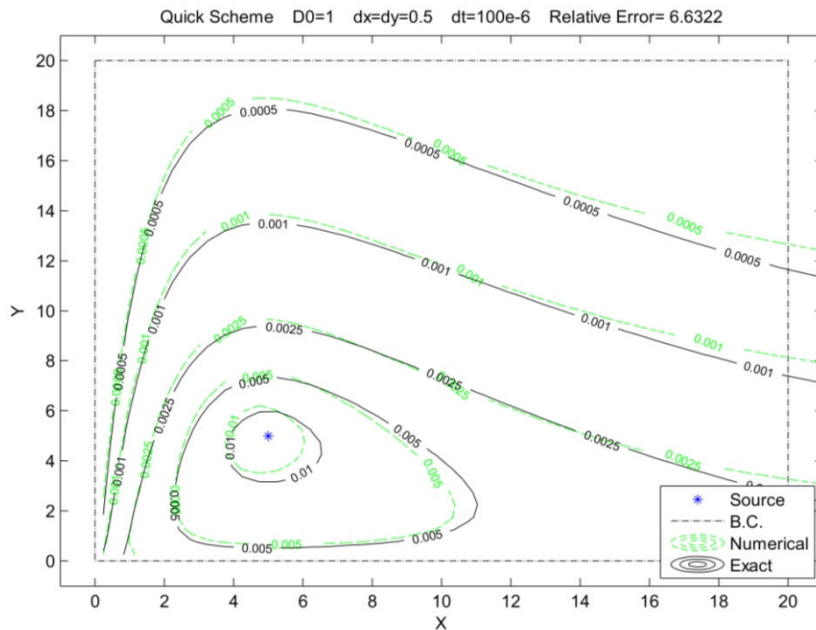
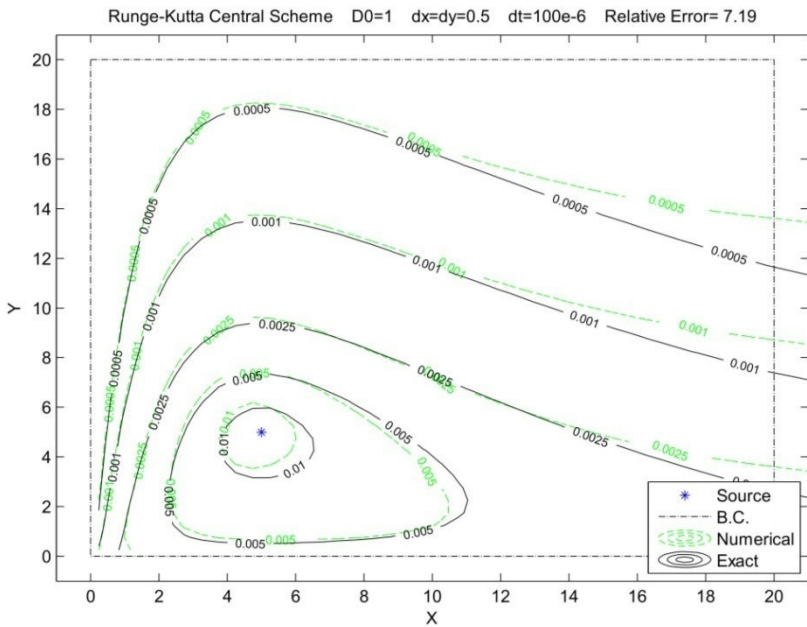
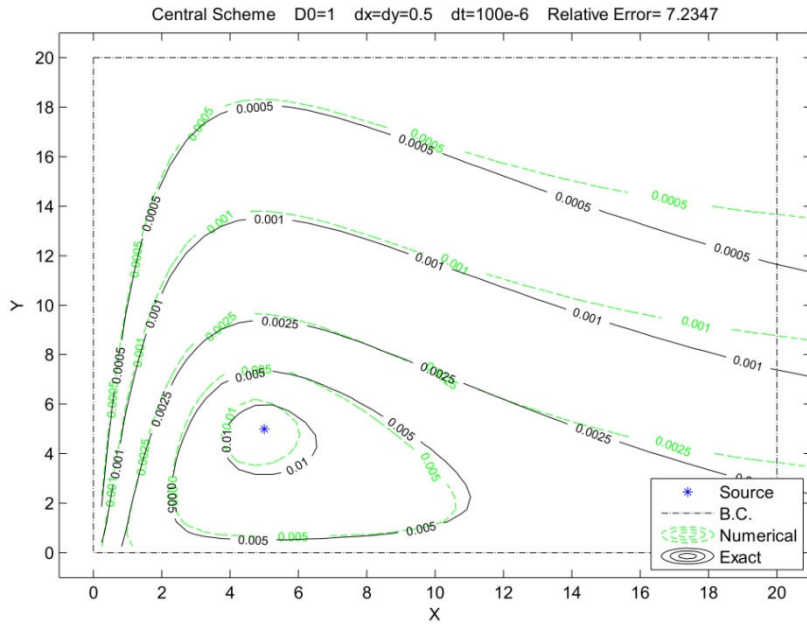


Upwind Scheme $D_0=1$ $dx=dy=0.5$ $dt=100e-6$ Relative Error= 7.5263



Runge-Kutta Upwind Scheme $D_0=1$ $dx=dy=0.5$ $dt=100e-6$ Relative Error= 7.4856





جداول زیر مقدار خطای حالات مختلف را نمایش می دهد.

Advection – Diffusion 2-Dimension				
Method	Order	$\Delta x = \Delta y$	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	1.0	1000e-6	Unstable
			500e-6	16.4389
			100e-6	16.5039
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	1.0	1000e-6	16.2443
			500e-6	16.3676
			100e-6	16.4860
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	1.0	1000e-6	Unstable
			500e-6	13.7398
			100e-6	13.7999
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	1.0	1000e-6	13.7370
			500e-6	13.7474
			100e-6	13.7969
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	1.0	1000e-6	Unstable
			500e-6	13.8485
			100e-6	13.9102

Advection – Diffusion 2-Dimension				
Method	Order	$\Delta x = \Delta y$	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	0.5	500e-6	Unstable
			100e-6	7.5263
			50e-6	7.5317
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	0.5	500e-6	Unstable
			100e-6	7.4856
			50e-6	7.5083
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	0.5	500e-6	Unstable
			100e-6	7.2347
			50e-6	7.2407
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	0.5	500e-6	Unstable
			100e-6	7.1900
			50e-6	7.2126
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	0.5	500e-6	Unstable
			100e-6	6.6322
			50e-6	6.6380

Advection – Diffusion 2-Dimension				
Method	Order	$\Delta x = \Delta y$	Δt	Relative Error
Forward in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t)$	0.2	50e-6	Unstable
			20e-6	4.3867
			10e-6	4.3749
3 stage Runge-Kutta in Time First order upwind in Space	$O(\Delta x, \Delta t^3)$	0.2	50e-6	4.5620
			20e-6	4.4108
			10e-6	4.3842
Forward in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t)$	0.2	50e-6	Unstable
			20e-6	5.6149
			10e-6	5.6036
4 stage Runge-Kutta in Time Central in Space	$O(\Delta x^2, \Delta t^4)$	0.2	50e-6	Unstable
			20e-6	5.5585
			10e-6	5.5646
Forward in Time Quick in Space	$O(\Delta x^3, \Delta t)$	0.2	50e-6	Unstable
			20e-6	4.2300
			10e-6	4.2098

٨- منابع و مراجع

- Abbot , M. B. and D. R. Basco (1997). Computational Fluid Dynamics: An Introduction for Engineers, Longman Singapore Publisher (Pte) Ltd.
- Abernathy , A. R., G. L. Larson , et al. (1984). "Heavy metal in the surface sediment of Fontana lake , north Carolina." Water res **Vol. 18**: 351-354.
- Ataie-Ashtiani, B., D. A. Lockington, et al. (1996). "Numerical correction for finite difference solution of the advection-dispersion equation with reaction." Journal of Contaminant Hydrology **23**: 149-156.
- Barry, D. A. and G .Sposito (1989). "Analytical solution to a convection-dispersion model timedependent transport coefficients." Water Resour Research **25(12)**: 2407-2416.
- Benton , E. R. and G. W. Platzman (1972). "A table of solutions of the one-Dimensional Burgers Equation." Q. Appl. Math **Vol. 30**: 152-212.
- Blazek, J. (2001). Computational Fluid Dynamics:Principles and Applications, ELSEVIER.
- Chao, X. B., Y. F. Jia, et al. (2006). Three dimensional numerical simulation of flow and mass transport in a shallow oxbow lake. World Water & Environmental Resources Congress. Salt Lake City., ASCE.
- Fisher, H. B., E. J. List , et al. (1979). Mixing in Inland and Costal Waters. Academic Press .Inc. San Diego.
- John D. Anderson Jr., J. D., G´erard Degrez, Erik Dick, and R. G. a. J. Vierendeels (2008). Computational Fluid Dynamics An Introduction, Springer.
- Kashefipour, S. M. and R. A. Falconer (2002). "Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Channels." Water Research **Vol. 36**: 1596-1608.
- Kumar , A., D. Jaiswal , et al. (2009). "Analytical solutions of one-dimensional advection–dispersion equation with variable coefficients in a finite domain." Journal of Earth Syst. Sci. **No. 5**: 539–549.
- Marsily, G. (1986). Quantitative Hydrology, groundwater hydrology for engineers. Academic Press. Inc. San Diego.
- Metcalf and I. Eddy (1972). Wastewater Engineering. Mc Grow-Hill book comp. NewYork , USA.
- Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor & Francis.
- Piasecki, M. and N. D. Katopodes (1997). "Control of Contaminant Release in Rivers. II Optimal Design." ASCE Hydraulic Engineering **123**.
- Tannehill , J. C., D. A. Anderson , et al. (1979). Computational Fluid Mechanics & Heat Transfer, Taylor & Francis.
- 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.

Zoppou, C. and J. H. Knight (1999). "Analytical solution of a spatially variable coefficient advection-diffusion equation in up to three dimensions." Applied Mathematical Modelling **23**: 667-685.

انصاری پور ، ا. ح. ک. ابراهیمی ، (۱۳۹۰). مقایسه حل تحلیلی و روش های عددی در مقابل داده های مدل آزمایشگاهی در پیش بینی حرکت آلودگی در جریان های یک بعدی. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران. بجنوردی، ب. (۱۳۸۴). بررسی آلودگی آب های زیرزمینی. فصل نامه بین المللی مهندسی آب. شماره ۲: ۳۹.

ترابیان ، ع. و س. ح. هاشمی (۱۳۸۱). مدلسازی کیفی آب های سطحی سینتیک ها ، ثابت ها و نرخ ها، انتشارات دانشگاه تهران.

حقیقی ، س. ا. و ح. عربی (۱۳۸۸). شبیه سازی پخش فلزات سنگین در رودخانه کارون. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده فنی ، دانشگاه تهران. خانی ، م. ر. و ر. شریفی پور (۱۳۸۲). محیط زیست و بهداشت محیط ، آب و آلودگی های آن، انتشارات خانیران.

خداشناس، س. (۱۳۸۹). مدل سازی عددی در مهندسی هیدرولیک، انتشارات فدک ایساتیس. دبیری، م. (۱۳۷۹). آلودگی محیط زیست هوا - آب - خاک - صوت، نشر اتحاد. زراتی، ا. و م. هادیان (۱۳۸۸). مدل های عددی آبهای کم عمق و کاربر آنها در مهندسی رودخانه و سواحل معادلات حاکم و روش های حل، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر. شجاعی فرد، م. و ع. نورپورهشترودی (۱۳۷۹). مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی CFD، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

شمسی ، ا. ط. (۱۳۷۹). هیدرولیک محاسباتی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر. طهماسبی بیرگانی ، ی. و ن. محسنی (۱۳۸۸). تأثیر پارامتر های هیدرولیکی رودخانه در انتشار لحظه ای آلاینده. مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.

عابدینی، ا. ع. (۱۳۸۹). مدلسازی سه بعدی جریان در رودخانه با کاربرد اطلاعات دقیق یک بعدی دانشکده فنی، دانشگاه تهران. رساله دکتری.

عطائی آشتیانی ، ب. ح. ر. حسین آبادی ، (۱۳۸۵). مدل عددی انتقال و تخلیه آلاینده ها از آبخوان ساحلی به دریا. تحقیقات منابع آب ایران. شماره ۲: ۱.

غیائی، ر. (۱۳۶۸). مدل ریاضی انتقال و انتشار مواد آلوده در رودخانه ها و مجاری انتقال آب. دانشکده فنی، دانشگاه تهران. پایان نامه کارشناسی ارشد

کاشفی پور ، س. م. (۱۳۸۹). دینامیک محاسباتی رودخانه، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

کرمی ، ث.ا. ر. غواصیه ، (۱۳۸۸). شبیه سازی عددی گسترش آلودگی در محیط رودخانه و بررسی عوامل مؤثر در آن. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده فنی دانشگاه تهران.

کی نژاد ، م. ع. و س. ابراهیمی مهندسی محیط زیست، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند. کیامنش ، ح. (۱۳۸۸). هیدرولیک محاسباتی، نشر ترآوا.

محمدی ، م. ع. (۱۳۸۱). هیدرولیک جریان در کانال ها و رودخانه ها - جریان و فرآیندهای حمل در کانال ها با شکل هندسی ساده، انتشارات دانشگاه ارومیه.

مخبری ، ف.ا. (۱۳۷۷). روش های آزمایش آب ، فاضلاب ، خاک، انتشارات دانشگاه مازندران.

مشعل ، م. (۱۳۸۶). هیدرولیک در مهندسی عمران و محیط زیست، انتشارات دانشگاه تهران. مهاجر، م.، ر. امینی، (۱۳۹۰). مدلینگ جریان پساب صنعتی در رودخانه با استفاده از CFD به منظور مدیریت منابع آب و محیط زیست (مطالعه موردی پتروشیمی بجنورد). دانشکده عمران معماری. شاهرود، دانشگاه صنعتی.

ناصری، س. و م. ت. قانعیان (۱۳۸۱). مدیریت کیفیت آب در دریاچه ها و رودخانه ها، مؤسسه علمی فرهنگی نص (تهران).

نیری، م. (۱۳۷۸). بررسی توزیع آلودگی در رودخانه های منحنی شکل. دانشکده فنی مهندسی. مشهد، دانشگاه فردوسی. پایان نامه کارشناسی ارشد.

Abstract

Rivers and surface water are two major media to release pollutants into the environment and consequently to the human food chain. Rivers receive wastewaters from human activities, and due to advection - diffusion are capable of dilute the pollutants and reduce the concentration of contaminants. This property, known as self attenuation, enables the release of the contaminated wastewaters 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 interest since the region of high concentration pollution is confined. The most preferred method to enhance the mixing process is elevation of turbulence in the flow. One of the natural techniques to do so is sudden expansion which accelerates the diffusion process. In this study, the effect of different entry points of pollutant , expansion ratios and flow rates was studied through a two-dimensional numerical model in which the distribution of pollution in an expansion was programmed in FORTRAN and MATLAB. The results showed that a sudden expansion with a ratio in the range of 0.1 to 0.2 is more efficient.

Keywords: Advection - Diffusion Equation, Distribution of pollution , Finite Volume method , Sudden expansion