

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

بررسی عددی توزیع جریان ورودی‌های نقطه‌ای در مخازن روباز: مطالعه موردی

تزریق نانو حباب در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

نگارنده

مریم خزلی

استاد راهنما

دکتر سیدفضل الله ساغروانی

دی ۹۷

دانشکده : عمران

گروه : مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مریم خزلی به شماره دانشجویی: ۹۵۰۵۴۸۴

تحت عنوان: بررسی عددی توزیع جریان ورودی‌های نقطه‌ای در مخازن روباز: مطالعه

موردی تزریق نانو حباب در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه

..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ

مقدس ترین واژه مادر لغت نامہ دلم،

مادر مہربانم کہ زندکیم را دیون مہر و عطف آن می دانم.

پدر، مہربانی مشفق، بردبار و حامی.

بوسہ بردستان پر مہرمان

قدردانی

استاد فرزانه و ارجمندم، جناب دکتر دکتر سید فضل الله ساغروانی، چگونه سپاس گویم، مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است، چگونه سپاس گویم تاثیر علم آموزی شما را، که چراغ هدایت، بر کلبه‌ی محتر و جودم فروزان ساخته است. در مقابل این همه عظمت و شکوهتان، مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف. از این که همیشه مرا حمایت فرمودید و بار اهنایی‌های ارزنده‌ی‌تان، مسیر را برایم هموار نمودید، و با سخنان امیدبخشان، دریچه‌ای از امید را به رویم گشودید، کمال تشکر و قدردانی را دارم. به پاس رنج‌های صادقانه‌تان، حرمت کلام عارفانه‌تان و حمایت‌های بی‌دریغتان از خداوند منان، سلامتی و کامیابی و توفیق روز افزون شما استاد بزرگوار را مسألت دارم.

تعهد نامه

اینجانب مریم خزلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی

شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عددی توزیع جریان ورودی‌های نقطه‌ای در مخازن روباز:

مطالعه موردی تزریق نانو حباب در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب تحت راهنمایی دکتر سیدفضل الله

ساغروانی، متعهد می‌شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر توزیع کننده‌های عمقی بر روی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب است که برای این منظور از مدل‌های ریاضی دینامیک سیالات محاسباتی برای تجزیه و تحلیل هیدرودینامیک حوضچه‌ها استفاده شده است. در این مطالعه چهار حوضچه تثبیت فاضلاب با آرایش توزیع کننده‌های عمقی مختلف به منظور ایجاد مومنوم برای عملیات هوادهی از کف مورد بررسی قرار گرفتند. هندسه اول فاقد توزیع کننده عمقی بود. هندسه دوم ۲۸ توزیع کننده، هندسه سوم ۵۵ و در هندسه چهارم ۱۶۰ توزیع کننده عمقی تعبیه شده است. سطح مقطع، حجم حوضچه‌ها و دبی ورودی در هر چهار حالت یکسان در نظر گرفته شد. به منظور شبیه سازی از نرم افزار متن باز OpenFOAM استفاده شد که به صورت عددی با جریان پایا و رژیم آشفته و استفاده از مدل آشفتگی $K - \epsilon$ شبیه سازی‌ها انجام شده است. نتایج نشان داد بکارگیری توزیع کننده‌های عمقی در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب، تأثیر قابل توجهی در کارایی و راندمان هیدرولیکی حوضچه‌ها دارد. تجزیه و تحلیل منحنی‌های توزیع زمان ماند نشان می‌دهد استفاده از توزیع کننده‌های عمقی منجر به یکنواختی پخش در جریان حوضچه می‌شود. در واقع با اختلاط بیشتر جریان و جلوگیری از تشکیل مسیرهای میان‌بر باعث می‌شود رفتار جریان به جریان پلاگ راکتور نزدیک شود، در نتیجه کارایی تصفیه در حوضچه افزایش یابد. از سوی دیگر با توجه به تأثیر مستقیم الگوی جریان بر چگونگی انباشت لجن در حوضچه، حضور توزیع کننده‌ها باعث کاهش مناطق مرده در نتیجه افزایش حجم موثر می‌شود بنابراین ظرفیت تصفیه افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان گفت، استفاده از سیستم توزیع کننده‌های عمقی و تزریق میکرو - نانو حباب در حوضچه، باعث بهتر شدن عملکرد هیدرولیکی و در نهایت بهبود راندمان تصفیه می‌شود.

کلید واژه‌ها: نرم‌افزار OpenFOAM، دینامیک سیالات محاسباتی، حوضچه‌های تثبیت فاضلاب، عملکرد هیدرولیکی، میکرو - نانو حباب، توزیع کننده‌های عمقی، جریان آشفته.

فصل اول..... ۱

- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ بیان مسأله..... ۳
- ۳-۱ ضرورت انجام پژوهش..... ۳
- ۴-۱ اهداف پژوهش..... ۴
- ۵-۱ ساختار پایان نامه..... ۵

فصل دوم..... ۷

- ۱-۲ مقدمه..... ۸
- ۲-۲ فاضلاب..... ۸
- ۳-۲ اهمیت تصفیه فاضلاب..... ۹
- ۴-۲ حوضچه های تثبیت فاضلاب..... ۹
- ۵-۲ هوادهی..... ۱۱
- ۶-۲ میکرو – نانو حباب ها..... ۱۲
- ۶-۲-۱ تعریف و ویژگی ها..... ۱۲
- ۶-۲-۲ فشار داخلی زیاد..... ۱۲
- ۶-۲-۳ تفاوت های کلیدی MBs و NBS..... ۱۳
- ۶-۲-۴ مطالعات انجام شده در راستای استفاده از تکنولوژی میکرو نانو حباب در زمینه تصفیه آب و فاضلاب..... ۱۴
- ۷-۲ ضرورت مطالعات ردیاب در حوضچه های تثبیت فاضلاب..... ۱۵
- ۷-۲-۱ فاکتورهای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه های تثبیت فاضلاب..... ۱۶
- ۷-۲-۲ زمان ماند متوسط..... ۱۶
- ۷-۲-۳ واریانس منحنی..... ۱۷
- ۷-۲-۴ حجم مفید و حجم مرده حوضچه..... ۱۷
- ۷-۲-۵ مسیر میان بر(اتصال کوتاه)..... ۱۹
- ۷-۲-۶ راندمان هیدرولیکی..... ۱۹
- ۸-۲ مطالعات ردیاب انجام شده به صورت میدانی در حوضچه های تثبیت فاضلاب..... ۲۰
- ۹-۲ بررسی عملکرد هیدرولیکی حوضچه های تثبیت فاضلاب..... ۲۱
- ۱۰-۲ معرفی نرم افزار OpenFOAM..... ۳۱

فصل سوم..... ۳۳

۳۴	۱-۳ مقدمه
۳۴	۲-۳ سیستم حوضچه مورد مطالعه
۳۶	۳-۳ سیستم محاسباتی مورد استفاده در این پژوهش
۳۶	۴-۳ نرم افزار OpenFOAM
۳۷	۱-۴-۳ پیش پردازش
۳۹	۲-۴-۳ پردازش
۴۰	۳-۴-۳ پس پردازش
۴۱	۵-۳ جزئیات حلگر انتخابی
۴۱	۱-۵-۳ فایل blockMeshDic
۴۱	۲-۵-۳ فایل controlDict
۴۱	۳-۵-۳ فایل decomposeParDic
۴۱	۴-۵-۳ فایل FVSolution
۴۴	۵-۵-۳ فایل fvScheme
۴۵	۳-۶ مطالعات عددی ردیاب
۴۷	۷-۳ رژیم جریان
۴۸	۸-۳ معیار سنجش رژیم جریان آرام و آشفته
۴۸	۹-۳ مروری بر روش های RANS
۴۹	۱-۹-۳ مدل استاندارد $K - \epsilon$
۵۰	۲-۹-۳ تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد $K - \epsilon$
۵۱	۳-۹-۳ تابع دیوار استاندارد

فصل چهارم..... ۵۳

۵۴	۱-۴ مقدمه
۵۵	۲-۴ بررسی صحت مدل سازی در نرم افزار OpenFOAM
۵۵	۱-۲-۴ بیان مسأله
۵۷	۲-۲-۴ ارائه نتایج و فرآیند مدل سازی در نرم افزار OpenFOAM
۶۳	۳-۴ مدل سازی مسأله در نرم افزار OpenFoam
۶۴	۴-۴ نتایج و بحث
۶۴	۱-۴-۴ بررسی تاثیرات توزیع کننده در حوضچه

۷۱..... ۲-۴-۴ منحنی توزیع زمان ماند

۷۳..... ۳-۴-۴ ارزیابی پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه های تثبیت فاضلاب

۷۹..... فصل پنجم

۷۹..... نتیجه گیری و پیشنهادها

۸۰..... ۱-۵ نتیجه گیری

۸۳..... ۲-۵ پیشنهادها

۸۴..... منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- افزایش فشار داخلی میکرو حباب در طول انقباض (Li, Takahashi et al. 2009)..... ۱۳
- شکل ۲-۲- اکسیژن محلول (Liu, Wang et al. 2010)..... ۱۵
- شکل ۱-۴- هندسه ۱، حوضچه مورد مطالعه در تحقیقات لیزیم (Lizima 2013) ۵۶
- شکل ۲-۴- مشاهدات میدانی لیزیم (Lizima 2013)..... ۵۹
- شکل ۳-۴- خطوط جریان به دست آمده از نتایج مدل سازی دو بعدی در تحقیق لیزیم (Lizima 2013)..... ۵۹
- شکل ۴-۴- خطوط جریان به دست آمده در این پژوهش جهت اعتبارسنجی..... ۵۹
- شکل ۵-۴- مقایسه ی منحنی زمان ماند حاصل از مطالعات میدانی ردیاب (Lizima 2013) و منحنی زمان ماند حاصل از این پژوهش..... ۶۰
- شکل ۶-۴- منحنی نرمال شده RTD ، مقایسه ی زمان وقوع اولین نقطه اوج ردیاب در مطالعات میدانی گذشته (Lizima 2013) و این پژوهش..... ۶۰
- شکل ۷-۴- هندسه دوم مجهز به توزیع کننده، حاوی ۲۸ توزیع کنند ۶۴
- شکل ۸-۴- هندسه سوم مجهز به توزیع کننده، حاوی ۵۵ توزیع کننده..... ۶۴
- شکل ۹-۴- هندسه چهارم مجهز به توزیع کننده، حاوی ۱۶۰ توزیع کننده ۶۴
- شکل ۱۰-۴- توزیع سرعت جریان در صفحه ی افقی (X-Y) در حوضچه های مربوط به هندسه های ۲، ۳ و ۴، (الف- پ- ث) در عمق ۵cm از کف حوضچه جهت بررسی روزنه های واقع در کف، (ب-ت-ج) در مرکز مقطع ورودی جریان در ارتفاع ۱/۱m از کف ۶۷
- شکل ۱۱-۴- پروفیل های طولی و عرضی توزیع سرعت در حوضچه های مربوط به هندسه های ۲، ۳ و ۴..... ۶۸
- شکل ۱۲-۴- تصاویر لحظه ای از انتقال ردیاب در صفحه افقی (X-Y) و در مدت زمان های مختلف ۰،۲/۵ و ۴ روز بعد از آزاد سازی اولیه ی ردیاب در مقطع ورودی جریان..... ۷۱
- شکل ۱۳-۴- مقایسه منحنی های توزیع زمان ماند مربوط به چهار هندسه مدل سازی شده در این پژوهش..... ۷۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱- مشخصات رایانه ی استفاده شده در این پژوهش	۳۶
جدول ۳-۲- روش های گسسته سازی و حل معادلات در OpenFOAM	۴۵
جدول ۳-۳- ضرایب مورد استفاده در معادله های مدل استاندارد $K - \epsilon$	۵۰
جدول ۴-۱- مشخصات سیال و شرایط مرزی حاکم بر مسأله جهت اعتبار سنجی با استفاده از OpenFOAM	۵۷
جدول ۴-۲- مقایسه ی نتایج میدانی و نتایج مدل سازی با OpenFOAM	۶۲
جدول ۴-۳- مقایسه ی فاکتورها و پارامترهای ارزیابی عملکرد تصفیه برای هندسه های ۱ تا ۴	۷۴

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه به دلیل رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، صنعت و افزایش زمین‌های زیر کشت، مصرف سرانه آب و به تبع آن تولید فاضلاب افزایش چشم‌گیری یافته است. به همین دلیل، تکنولوژی استفاده از پساب تصفیه شده با کیفیت بالا به عنوان یک منبع آب قابل اعتماد و پایدار بیش از پیش مورد توجه مدیران صنعت آب قرار گرفته است. استفاده از پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب در کشاورزی و صنعت مزایای متعددی از قبیل فراهم نمودن یک منبع آب ارزان و دائمی، کاهش هزینه‌های تصفیه، آزاد سازی بخشی از منابع آب با کیفیت بالا برای سایر مصارف، کاهش مصرف کود شیمیایی و اثرات زیست محیطی آن و نهایتاً کاهش اثرات زیست محیطی دفع پساب را به دنبال دارد. از این رو بسیاری از کشورها به دنبال روش‌هایی برای تصفیه فاضلاب هستند که خروجی آن دارای کیفیت بالایی بوده و قابلیت استفاده مجدد را داشته باشد.

یکی از مهمترین روش‌های تصفیه که سالهاست در کشورهای پیشرفته و کشورهای در حال توسعه مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب^۱ است. حوضچه‌های تثبیت قادرند ۹۹/۹٪ عوامل بیماری‌زا و بیش از ۹۰ تا ۹۵٪ آلودگی‌ها را از فاضلاب حذف کنند.

برکه‌های تثبیت فاضلاب جزء فرآیند نسبتاً ساده و ارزان برای تصفیه فاضلاب‌های شهری هستند که به طور گسترده در مناطق گرمسیری در کشورهای در حال توسعه مورد استفاده قرار می‌گیرند. کارایی برکه تثبیت فاضلاب در کاهش میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا است و تحت تأثیر عوامل محیطی، خصوصیات کیفی فاضلاب و شرایط بهره‌برداری تغییر می‌کند. درجه حرارت، زمان ماند هیدرولیکی، شدت نور خورشید، غلظت اکسیژن محلول و pH مهمترین عوامل تأثیرگذار بر کارایی فرآیندهای تصفیه مذکور در کاهش عوامل بیماری‌زا هستند.

¹ Wastewater Stabilization Pond

۱-۲ بیان مسأله

با توجه به بحران آب، استفاده از حوضچه‌های تثبیت به منظور تصفیه فاضلاب می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای ایجاد یک منبع آب پایدار به حساب آید. بنابراین با توجه به اهمیت حوضچه‌های تثبیت فاضلاب و همچنین نقش موثر میکرو نانو حباب در انتقال و پخش اکسیژن در محیط‌های آبی و اهمیت وجود اکسیژن در انجام فرآیند تصفیه و با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی به منظور بررسی اثر توزیع و پخش میکرو نانو حباب به وسیله‌ی توزیع کننده‌های عمقی بر روی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب انجام نشده است. برای این منظور از مدل‌های ریاضی دینامیک سیالات محاسباتی برای تجزیه و تحلیل هیدرودینامیک حوضچه‌ها استفاده شده است. حوضچه تثبیت فاضلاب با آرایش توزیع کننده‌های عمقی مختلف به منظور توزیع مومنتوم برای عملیات هوادهی از کف مورد بررسی قرار گرفتند و عملکرد آن‌ها با حوضچه بدون توزیع کننده مقایسه گردید. جریان و انتقال ردیاب با حل عددی و سه بعدی معادلات RANS^۱ و استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM شبیه‌سازی شدند.

۱-۳ ضرورت انجام پژوهش

امروزه با توجه به کمبود منابع آب، تصفیه موثر فاضلاب یک پیش نیاز عمده برای رشد اقتصاد است. بنابراین توسعه و پیاده‌سازی تکنولوژی‌های پیشرفته تصفیه فاضلاب با کارایی بالا، نیاز کم به سرمایه‌گذاری و سرعت عملکرد بالا ضروری است. با توجه به مزیت‌های برتر، از جمله اقتصادی بودن سیستم حوضچه‌های تثبیت فاضلاب نسبت به سایر روش‌های تصفیه فاضلاب در بسیاری از نقاط جهان محققان زیادی به بررسی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب با استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته‌اند. در واقع بهبود عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب یک استراتژی مهم مدیریتی است که حفاظت از سلامت عمومی و محیط زیست و

¹ Reynolds-averaged Navier-Stokes

همچنین استفاده مجدد از پساب تصفیه شده را ممکن می‌سازد. با توجه به پیشرفت‌های فناوری محاسباتی، روش‌های قدرتمند عددی برای حل معادلات پیچیده مکانیک سیالات، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، فضا برای بهینه سازی این سیستم‌ها از دیدگاه عملکرد هیدرولیکی با توجه به کیفیت پساب خروجی و مصرف انرژی نیاز زیادی وجود دارد. در واقع استفاده از مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی به طور قابل اطمینانی با پیش‌بینی هیدرودینامیک جریان آب درون حوضچه امکان تحقیق در مورد عملکرد هیدرولیکی برای طیف وسیعی از پیکر بندی‌ها و سناریوهای طراحی را فراهم می‌آورد. طراحی بهینه حوضچه‌ها بر اساس شاخص راندمان هیدرولیکی به منظور بررسی اختلاط هیدرودینامیکی جریان است. از این رو با توجه به اهمیت هوادهی در تصفیه فاضلاب و اهمیت وجود اکسیژن که منجر به تسریع فرآیند تصفیه می‌گردد، با تزریق و پخش یکنواخت میکرو نانو حباب در حوضچه می‌توان گامی در راستای بهبود عملکرد حوضچه‌ها برداشت. در واقع با تزریق یکنواخت میکرو نانو حباب از کف حوضچه می‌توان باعث اختلاط هرچه بیشتر جریان آب درون حوضچه‌ها شد که این اختلاط هیدرودینامیکی جریان، محیطی یکنواخت در تمام آب حوضچه ایجاد می‌کند. بنابراین طراحی هندسی حوضچه به صورتی که از روزه‌های تعبیه شده در کف حوضچه میکرو نانو حباب تزریق شود ضروری است، تا به توان به بالاترین میزان اختلاط دست یافت.

۱-۴ اهداف پژوهش

هدف اصلی از انجام این مطالعه، بررسی اثر میکرو نانو حباب تزریق شده به صورت نقطه ای از کف حوضچه تثبیت فاضلاب بر روی توزیع یکنواخت و عملکرد هیدرولیکی حوضچه است زیرا این امر منجر به افزایش بازدهی عملکرد تصفیه خانه، کاهش مصرف انرژی و کاهش تبخیر از سطح آب و افزایش کیفیت پساب خروجی از طریق افزایش هوادهی و میزان اختلاط در حوضچه‌ها با تزریق میکرو نانو حباب می‌گردد. بعلاوه یافتن موقعیت و آرایش روزه‌های تزریق از کف حوضچه است، به طوری که پخش یکنواخت جریان در حوضچه حاصل گردد. همچنین با توجه به اینکه مشخصات هندسی و موقعیت

تزریق میکرو نانو حباب‌ها تأثیر بسزایی در توزیع یکنواخت میکرو نانو حباب در مخزن دارد سعی بر این است که مشخصات بهینه هندسی و موقعیت تزریق تعیین شود. این پژوهش قابل کاربرد در طراحی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب توأم با روزنه‌های تعبیه شده در کف حوضچه جهت تزریق میکرو نانو حباب می‌باشد. هدف نهایی این تحقیق بررسی توانایی مدل‌های سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی برای توصیف الگوهای هیدرودینامیکی در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب و سپس عملکرد حوضچه‌های تثبیت فاضلاب است.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است، در فصل یک به بیان کلیات پژوهش پرداخته شده است. در فصل دوم به بررسی و بیان ادبیات فنی و پیشینه پژوهش در رابطه با حوضچه‌های تثبیت فاضلاب و اهمیت هوادهی و اکسیژن در آن‌ها و کاربرد میکرو نانو حباب برای تصفیه فاضلاب و همچنین مطالعات عددی ردیاب و نحوه‌ی استفاده از منحنی زمان ماند هیدرولیکی برای ارزیابی پارامترهای موثر بر هیدرولیک حوضچه‌ها بیان شده است. بعلاوه در بخش آخر به مدل‌های ریاضی حوضچه‌ها جهت بررسی مطالعات هیدرولیکی پرداخته می‌شود و نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش به اختصار شرح داده شده است. فصل سوم با عنوان روش‌شناسی تحقیق، به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شود؛ در قسمت اول، مشخصات حوضچه مورد مطالعه و سیستم محاسباتی مورد استفاده در این پژوهش و تنظیمات مربوط به شبیه سازی جریان و مطالعات عددی ردیاب ارائه شده است. و در قسمت دوم به مطالعات مربوط به جریان شامل رژیم جریان و مدل سازی آشفتگی پرداخته شده است در فصل چهارم نتایج به دست آمده از این پژوهش در رابطه با بررسی صحت سنجی هیدرولیک حوضچه و همچنین بررسی هیدرولیک حوضچه در حضور توزیع کننده‌های عمقی با آرایش و موقعیت‌های مختلف در حوضچه، بحث شده است. در نهایت بررسی نتایج و نتیجه‌گیری از پژوهش انجام شده در فصل پنجم با عنوان نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه شده است.

فصل دوم

ادبیات فنی و پیشینه تحقیق

۲-۱ مقدمه

مطالب این فصل شامل چهار بخش اصلی است. بخش اول شامل مطالبی در رابطه با فاضلاب، اهمیت تصفیه فاضلاب و حوضچه‌های تثبیت فاضلاب به عنوان روش مقرون به صرفه برای تصفیه فاضلاب است. در بخش دوم به بررسی اهمیت هوادهی در فرایند تصفیه فاضلاب و همچنین خواص و خصوصیات میکرو نانو حباب‌ها به منظور استفاده به عنوان توزیع کننده‌های عمقی، جهت هوادهی در فاضلاب پرداخته شده است و در بخش سوم به بررسی مطالعات ردیاب و شاخص‌های موثر بر تجزیه و تحلیل هیدرولیک و هیدرودینامیک حاکم بر حوضچه‌های تثبیت فاضلاب پرداخته شده است، در انتها مطالعات انجام شده بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب به کمک مدل‌های ریاضی حل جریان، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش به اختصار به معرفی نرم‌افزار OpenFOAM پرداخته می‌شود.

۲-۲ فاضلاب

فاضلاب به محلول حاصل از آب، پس از استفاده در فعالیت‌های گوناگون گفته می‌شود. از آنجا که استفاده از آب پارامترهای کیفی آن اعم از شیمیایی، فیزیکی یا زیستی را از سطح استاندارد مورد نظر پایین می‌آورد استفاده مجدد از آن نیاز به طی مراحل دارد که به آن تصفیه گفته می‌شود. در اصطلاح فنی، فاضلاب به هر نوع آب یا مایعی که حاوی غلظت‌های نامناسبی از ناخالصی یا مواد آلاینده به شکل جامد، مایع، گاز و یا ترکیبی از این سه باشد اطلاق می‌شود که تخلیه‌ی مستقیم آن به محیط زیست، آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی و خاک را در پی خواهد دارد (علوی مقدم و صدری مقدم، ۱۳۹۲). معمولاً فاضلاب شامل ۹۹/۹٪ آب و ۰/۱٪ جامدات است. ناپایدار سازی آلاینده‌های موجود در فاضلاب و جداسازی آن‌ها اساس تصفیه فاضلاب را تشکیل می‌دهد (حسینیان، ۱۳۸۲).

۲-۳ اهمیت تصفیه فاضلاب

توسعه شهرنشینی، پیشرفت صنعت و کشاورزی مشکلاتی را به همراه داشته است که از آن جمله می‌توان به تولید مقادیر قابل توجهی از فاضلاب شهری و صنعتی اشاره کرد. تخلیه این فاضلاب‌ها بدون تصفیه مناسب می‌تواند منجر به آلودگی شدید منابع آب شود. با توجه به محدود بودن منابع تجدید پذیر آب در جهان، ضرورت توجه به مسئله آلودگی فاضلاب‌های مختلف لزوم تحقیق پیرامون روش‌های بهینه تصفیه، بیش از پیش احساس می‌شود (علوی مقدم و صدری مقدم، ۱۳۹۲).

با کاهش منابع آب و آلودگی هر چه بیشتر این منابع در سال‌های اخیر، بسیاری از کشورها به دنبال روش‌های برای تصفیه فاضلاب هستند که خروجی آن دارای کیفیت بالایی بوده و قابلیت استفاده مجدد را داشته باشد (شریعت پناهی، ۱۳۹۱). یکی از متداول‌ترین روش‌های تصفیه‌ای که در سال‌های اخیر در کشورهای پیشرفته و به همان نسبت کشورهای در حال توسعه مورد توجه قرار گرفته است و به شدت در حال توسعه می‌باشد استفاده از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب می‌باشد (Mara 2013).

۲-۴ حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

حوضچه‌های تثبیت فاضلاب آبگیرهای عریض و کم عمق هستند که به وسیله‌ی خاکریز احاطه شده‌اند در این حوضچه‌ها فاضلاب خانگی و دیگر فاضلاب‌ها برای مدت نسبتاً طولانی نگهداری می‌شود تا به روش کاملاً طبیعی بر اثر هم‌زیستی مسالمت آمیز جلبک‌های سبز و باکتری‌ها از طریق فتوسنتز و تولید اکسیژن کافی برای فعالیت‌های حیاتی تصفیه فاضلاب، عمل تصفیه را انجام می‌دهند. در واقع برکه‌های تثبیت ساده‌ترین نوع روش تصفیه فاضلاب محسوب می‌شوند که عمل تصفیه را با کم‌ترین هزینه، حداقل امکانات فنی و حداقل مصرف انرژی انجام می‌دهند. نظر به اینکه این فرآیندها مهندسی شده نیستند، سرعت اکسیداسیون آهسته‌تر و زمان ماند^۱ طولانی‌تر از دیگر روش‌های تصفیه فاضلاب

¹ Residence Time

است. از این رو این حوضچه‌ها به طور گسترده در مناطق گرمسیری و در جای که زمین کافی در اختیار باشد استفاده می‌گردد (Mara 2013). گرم بودن محیط نقش اساسی در تنظیم فعالیت‌های میکروبی ایفا می‌کند.

فعل و انفعالات تصفیه فاضلاب در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب به مراتب پیچیده‌تر از سایر روش‌های تصفیه فاضلاب است، عوامل موثر در این فعل و انفعالات که مهم‌ترین آن‌ها باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی است، در روش‌های مدرن تصفیه و حوضچه تثبیت فاضلاب مشترک است. به عنوان مثال همان طور که در روش‌های تصفیه هوازی، فعالیت باکتری‌ها در حضور اکسیژن محلول باعث اکسیده شدن آلوده کننده‌های فاضلاب می‌گردد، در روش‌های مدرن تصفیه، اکسیژن مورد نیاز از طریق هوادهی به فاضلاب تزریق می‌شود، در تصفیه از طریق حوضچه‌های تثبیت نیز اکسیژن محلول عامل مهم فعالیت باکتری‌های هوازی است. این اکسیژن از طریق تماس سطح حوضچه با اتمسفر و فعل و انفعالات فتوسنتز جلبک‌های سبز داخل حوضچه تثبیت فاضلاب در برابر نور خورشید تأمین می‌شود. در لایه‌های زیرین حوضچه‌های تثبیت فاضلاب که نمی‌تواند متأثر از نفوذ نور خورشید یا اکسیژن اتمسفر باشد باید در انتظار شکل‌گیری لایه‌های بی‌هوازی بود که اغلب محصولاتی توأم با بوهای نامطبوع را تولید می‌کند (حسینیان، ۱۳۸۲).

باتوجه به اینکه سیستم برکه‌های تثبیت فاضلاب در بسیاری از قسمت‌های دنیا مورد استفاده قرار گرفته است، اگر زمین کافی در دسترس باشد، برکه‌های تثبیت ارزان‌ترین روش تصفیه فاضلاب محسوب می‌شوند. برکه‌های تثبیت از نظر ساختمانی بسیار ساده و مهم‌ترین مرحله ساخت آن‌ها گودبرداری، تأسیسات تصفیه مقدماتی، سازه‌های ورودی و خروجی، جداره سازی و آب بندی دیواره‌ها و کف برکه می‌باشد که با استفاده از عوامل طبیعی، تصفیه فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، فاضلاب را به انجام می‌رساند (ندافی، ۱۳۷۵). این تکنولوژی پایدارتر از روش‌های مکانیکی تصفیه فاضلاب است (Muga and Mihelcic 2008).

۲-۵ هوادهی

هوادهی یک فرایند انتقال جرم گاز- مایع است، که در بسیاری از محیط‌های آبی از جمله استخرهای پرورش ماهی و نیز حوضچه‌های تصفیه فاضلاب حیاتی است. در طی عملیات هوادهی آب و هوا با هم مخلوط شده و در نتیجه میزان اکسیژن محلول در آب به حد اشباع نزدیک‌تر می‌شود و اکسیژن مورد نیاز برای مصرف ماهی و میکروارگانیسم‌ها تأمین می‌گردد. هوادهی علاوه بر تولید اکسیژن نوعی همزدن آب و یکنواخت کردن لایه‌های حرارتی و غذایی است.

تغییر کل غلظت اکسیژن محلول ناشی از هوادهی در آب تمیز کاملاً مخلوط به صورت رابطه ۱-۲ است (DeMoyer, Schierholz et al. 2003).

$$\frac{dc}{dt} = k_L \cdot a_t (C_{ss} - C) \quad (1-2)$$

که در آن k_L ضریب نرخ انتقال لایه‌ی مایع، $a_t = \frac{A_t}{V}$ سطح بینابینی برای انتقال در واحد حجم (l^{-1}) از آنجا که اندازه‌گیری این سطح امکان‌پذیر نیست از $k_L \cdot a_t$ به عنوان ضریب کلی انتقال جرم استفاده می‌شود که در آزمایشگاه و به صورت تجربی تعیین می‌گردد. C_{ss} غلظت اکسیژن محلول در حالت اشباع، C غلظت اکسیژن محلول در آب است.

سیستم هوادهی عمقی در دریاچه‌ها، مخازن و تأسیسات تصفیه فاضلاب برای افزایش میزان اکسیژن محلول و گردش بیشتر آب استفاده می‌شود. دیفیوزرهای هوادهی عمقی، حباب‌های هوا یا حباب‌های اکسیژن خالص را در عمق آزاد می‌کند. حباب‌های تولید شده به وسیله‌ی نیروی شناوری به سطح می‌آیند (Fischer, List et al. 2013).

در بین راه تبادل اکسیژن بین حباب و ملکول اطراف صورت می‌گیرد و محلول می‌تواند حتی به اشباع برسد.

۲-۶ میکرو - نانو حباب‌ها

۲-۶-۱ تعریف و ویژگی‌ها

میکرو حباب‌ها^۱ (MBs) و نانو حباب‌ها^۲ (NBS) به حباب‌های بسیار ریز اطلاق می‌شود. تعاریف متعدد و گاهی متناقض در خصوص قطر این نوع حباب‌ها در مقالات ذکر شده است ولی تعریف نسبتاً پذیرفته شده تر عبارتست از آنکه قطر میکرو حباب‌ها بین ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و قطر نانو حباب‌ها کمتر از ۲۰۰ نانومتر است. وجود میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها به عنوان یک واحد پایدار و ماندگار برای مدت زمان طولانی به علت برخی ملاحظات ترمودینامیکی مورد بحث و بررسی می‌گیرد (Ushikubo, Furukawa et al. 2010, Agarwal, Ng et al. 2011, Tsuge 2014).

۲-۶-۲ فشار داخلی زیاد

اختلاف فشار داخلی و بیرونی میکرو - نانو حباب‌ها خیلی زیاد است. فشار گاز درون یک حباب به علت پدیده کشش سطحی بزرگ‌تر از فشار بیرون آن است، فشار داخلی حباب‌ها از معادله یانگ - لاپلاس (۲-۲) محاسبه می‌شود (Atkins and De Paula 2006).

$$p_g = p_l + \frac{4\sigma}{d_b} \quad (2-2)$$

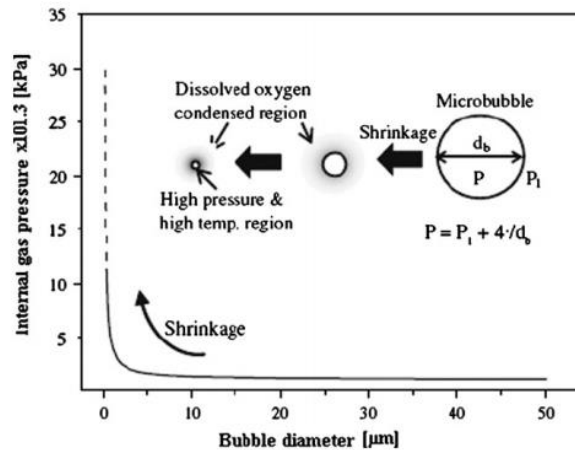
p_l و p_g به ترتیب فشار گاز و فشار مایع (Pa)، σ کشش سطحی ($N \cdot m^{-1}$) و d_b شعاع حباب (m) است. با توجه به معادله (۲-۲) می‌توان مشاهده کرد فشار داخلی حباب‌ها با قطر آن رابطه عکس دارد.

طبق رابطه (۲-۲) برای یک حباب با قطر $1 \mu m$ در دمای ۲۹۸k فشار داخلی تقریباً ۳۹۰ Kpa، که تقریباً ۴ برابر فشار اتمسفر است. با توجه به تناسب معکوس نرخ افزایش فشار داخلی با اندازه قطر

¹ Micro bubbles

² Nano bubbles

حباب، نقطه نهایی برای افزایش فشار داخلی سرانجام در مرحله‌ی فروپاشی میکرو حباب‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۱-۲) (Li, Takahashi et al. 2009).



شکل ۱-۲ - افزایش فشار داخلی میکرو حباب در طول انقباض (Li, Takahashi et al. 2009)

در واقع با انقباض میکرو حباب‌ها فشار داخلی آن‌ها به علت کشش سطحی افزایش یافته است (Takahashi, Kawamura et al. 2003, Takahashi 2005, Takahashi, Chiba et al. 2007).

طبق قانون هنری مقدار گاز حل شده در اطراف یک حباب کوچک با افزایش فشار گاز، افزایش می‌یابد. میکرو حباب‌ها همچنین به علت فشار داخلی زیاد متلاشی می‌شوند که از فروپاشی آن‌ها رادیکال‌های آزاد تولید می‌گردد (Takahashi, Chiba et al. 2007).

۲-۶-۳ تفاوت‌های کلیدی MBs و NBs

ماکرو حباب‌ها به سرعت در محیط‌های آبی به سطح آب می‌آیند و در سطح آب متلاشی می‌گردند. درحالی که قطر میکرو حباب‌ها در محیط‌های آبی به تدریج در طول زمان کاهش یافته و پس از یک ماندگاری طولانی به درون محیط‌های آبی متلاشی می‌شوند. نانوحباب‌ها مانند میکرو حباب‌ها برای مدت طولانی در محیط‌های آبی پایدار می‌مانند و در مدت زمان بسیار طولانی و به تدریج متلاشی می‌گردند (Takahashi 2009).

۲-۶-۴ مطالعات انجام شده در راستای استفاده از تکنولوژی میکرو حباب در زمینه

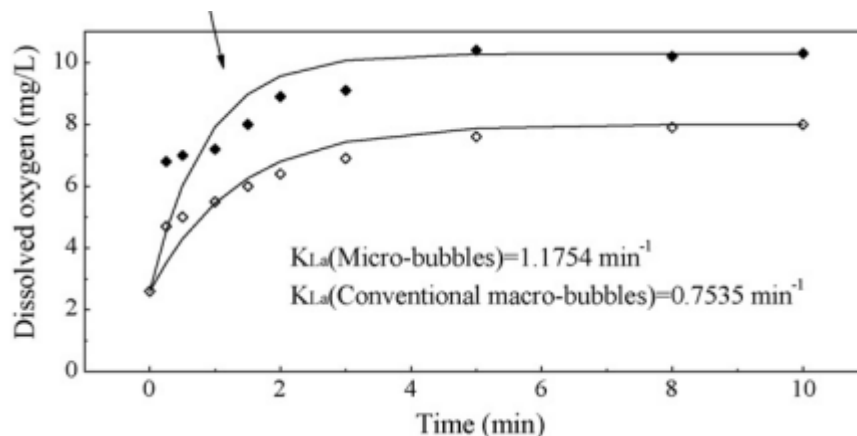
تصفیه آب و فاضلاب

در چند سال گذشته توجه زیادی به کاربرد میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها برای تصفیه آب و فاضلاب به دلیل توانایی آنها در تولید رادیکال‌های آزاد واکنش پذیر، شده است. همچنین از میکرو نانو حباب‌ها برای سم‌زدایی از آب استفاده می‌شود (Yamasaki, Sakata et al. 2010).

بر اساس مطالعات، هوا و نیتروژن موجود در NBS /MBS می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی و بی‌هوازی را افزایش دهد. براساس شواهد، نیتروژن میکرو نانو حباب‌ها نه تنها برای تصفیه آب و فاضلاب بلکه برای تخمیر و آماده‌سازی مایع تخمیر شونده جهت تصفیه فاضلاب انسانی کمک می‌کند. هدف اصلی از پیش تصفیه آب، کاهش بارهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی است، تا با کاهش هزینه‌های عملیاتی کیفیت آب مورد نیاز را افزایش داد. در این زمینه هوای موجود در MBS و NBS به عنوان یک روش پیش تصفیه بسیار مفید است و باعث کاهش رشد گیاهان جلبک و خزه در حوضچه‌های تصفیه آب و فاضلاب و بهتر شدن کیفیت آب تولیدی از تصفیه پساب خواهد شد (Yamasaki, Uda et al. 2009).

لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ با بررسی اثر میکرو حباب در فرآیند انعقاد و شناورسازی فاضلاب رنگی به این مهم دست یافتند که میکرو حباب‌ها می‌توانند نرخ انتقال اکسیژن بالاتری را داشته باشند. به طوری که ضریب حجمی انتقال اکسیژن میکرو حباب 1.1754 min^{-1} و در حباب‌های معمولی هوا 0.7535 min^{-1} است (شکل ۲-۲). بنابراین میکرو نانو حباب می‌تواند به میزان انتقال گاز بالاتری (تقریباً ۱/۶ برابر بیشتر) نسبت به حباب معمولی برسد (Liu, Wang et al. 2010).

¹ Liu



شکل ۲-۲- اکسیژن محلول (Liu, Wang et al. 2010)

باتوجه به خصوصیات ویژه‌ای که میکرو نانو حباب از خود نشان می‌دهد باعث افزایش میزان اکسیژن در آب و محیط‌های آبی در نتیجه افزایش راندمان اکسیژن‌دهی در محیط‌های آبی می‌شود. از این رو متعاقباً سبب افزایش ظرفیت تصفیه خانه‌های آب و فاضلاب، کاهش مصرف انرژی و افزایش بازدهی از طریق حذف شکل‌های متعارف هوادهی می‌گردد.

۷-۲ ضرورت مطالعات ردیاب در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر طراحی و راهبری سیستم‌های مختلف تصفیه فاضلاب است. ویژگی‌های هیدرولیکی جریان فاضلاب عبوری می‌تواند عاملی مهم در تعیین مشخصات و ابعاد بخش‌های مختلف باشد. سرعت و دبی جریان، نقش اساسی در طراحی واحدهای فیزیکی دارد. در خصوص بهسازی عملکرد تصفیه خانه‌های موجود باید گفت که هیدرولیک تصفیه خانه یک نقطه کانونی در برنامه بهبود عملکرد تأسیسات است. ظرفیت تصفیه خانه‌ها و انعطاف پذیری آن‌ها تابع هیدرولیک و ویژگی توزیع جریان است (WEF, 2008).

رویکرد اساسی در مطالعات هیدرولیک، آنالیز مربوط به تعادل جرم در حوضچه است (Eddy 1979). زمان ماند متوسط^۱ MRT، نوع، میزان و نحوه پراکندگی مواد در حوضچه، بازده حجمی حوضچه، میزان فضای مرده هیدرولیکی و وجود اتصال کوتاه^۲ در حوضچه و در نهایت نوع رفتار حوضچه (اختلاط کامل یا نهرگونه) به طور کلی به هیدرودینامیک جریان وابسته بوده و توسط پارامترهای هیدرودینامیکی تعیین می‌شود.

جهت به دست آوردن ویژگی‌های هیدرودینامیک جریان عبوری از حوضچه‌ها از منحنی زمان ماند^۳ (RTD) استفاده می‌شود. این منحنی یکی از مشخصات جریان عبوری از حوضچه است، که از آن به منظور محاسبه راندمان هیدرولیکی جریان که به نوبه خود وابسته به وضعیت هیدرودینامیکی جریان و بیانگر مدت زمان اقامت جریان درون حوضچه است استفاده می‌شود.

۲-۷-۱ فاکتورهای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

اطلاعات مفیدی از منحنی پراکندگی زمان ماند قابل دستیابی است که با تجزیه و تحلیل آن‌ها می‌توان به شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی موجود در حوضچه پی برد. در زیر به برخی از پارامترهای هیدرودینامیکی و چگونگی محاسبه آن‌ها از طریق اطلاعات آزمایش ماده ردیاب و منحنی RTD پرداخته می‌شود.

۲-۷-۲ زمان ماند متوسط

زمان ماند متوسط، نشان دهنده متوسط زمان حرکت ذره از ابتدا تا انتهای حوضچه بوده و از رابطه (۲-۳) به دست می‌آید (Metcalf 2003, Crittenden, Trussell et al. 2012). همچنین زمان ماند

¹ Mean Residence Time

² short-circuiting

³ Residence Time Distribution

تئوری با استفاده از رابطه (۴-۲) محاسبه می‌شود. زمان ماند متوسط به دلیل ایجاد فضای مرده و اتصال کوتاه در حوضچه با زمان ماند تئوری حوضچه اندکی تفاوت دارد.

$$\bar{t}_c = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (۳-۲)$$

که در آن $\bar{t}_c$ زمان ماند متوسط (day)، $C(t)$ غلظت ردیاب خروجی از حوضچه در هر لحظه است.

$$HRT = \frac{V}{Q} \quad (۴-۲)$$

که در آن HRT زمان ماند تئوری حوضچه (day)، V حجم حوضچه (m^3) و Q دبی ورودی به حوضچه ($\frac{m^3}{day}$) است

۳-۷-۲ واریانس منحنی

واریانس هر منحنی نشان دهنده نحوه پراکندگی داده‌ها، اطراف مقدار میانگین همان داده‌ها می‌باشد. واریانس کمتر بدین معنا است که انتظار می‌رود اگر نمونه‌ای از توزیع مزبور انتخاب شود مقدار آن به میانگین نزدیک باشد. با استفاده از رابطه (۵-۲) واریانس به دست می‌آید (DeCoursey 2003).

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t}_c)^2 C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (۵-۲)$$

با استفاده از شاخص‌های هیدرودینامیکی معرفی شده در این قسمت، می‌توان به برخی ویژگی‌های هیدرولیکی حوضچه‌ها پی برد. این شاخص‌ها به دلیل اهمیت خاص هیدرودینامیک جریان در حوضچه‌ها نقش مهمی در طراحی و راهبری آن دارد. این شاخص‌ها با پردازش نتایج منحنی‌های RTD به دست می‌آیند.

۴-۷-۲ حجم مفید و حجم مرده حوضچه

حجم مفید حوضچه قسمتی از فضای حوضچه است که واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی در آن صورت می‌گیرد، خارج از این قسمت به دلیل ناچیز بودن اختلاط با جریان ورودی فرآیند قابل توجهی رخ

نمی‌دهد. لذا حوضچه‌ای که فضای مفید بیشتری داشته باشد، عملکرد بهتری خواهد داشت. حجم مفید برای یک حوضچه برابر با نسبت زمان ماند تجربی به تئوریک است و از رابطه (۶-۲) به دست می‌آید (Thackston, Shields Jr et al. 1987).

$$e = \frac{\bar{t}_c}{HRT} \quad (۶-۲)$$

اهمیت رابطه (۶-۲) به این دلیل است که هر چه این مقدار به عدد یک نزدیک‌تر باشد، حوضچه به زمان ماند بهینه خود نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر زمان ماند هیدرولیکی و زمان ماند تئوری بر هم منطبق می‌گردند و این موضوع باعث بهینه بودن عملکرد حوضچه می‌گردد.

علاوه بر تطابق زمان ماند هیدرولیکی و تئوری، وجود فضای مرده یا اتصال کوتاه وابستگی زیادی به نسبت مزبور دارد. برطبق تعریف، در صورتی که در حوضچه فضای مرده وجود داشته باشد، $\bar{t}_c < HRT$ و در صورتی که در حوضچه اتصال کوتاه وجود داشته باشد، $\bar{t}_c > HRT$ خواهد بود.

میزان فضای مرده هیدرولیکی از پارامترهای مهمی است که در بررسی هیدرودینامیکی حوضچه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. زیرا بیانگر کاهش حجم مؤثر حوضچه، که در آن واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد، است.

بخشی از حوضچه که در فضای مرده هیدرولیکی قرار می‌گیرد، با جریان سیال ورودی اختلاط نمی‌یابد (Metcalf 2003). در واقع فضای مرده یا ناحیه راکد به قسمتی گفته می‌شود که درجه اختلاط قابل اغماض است از این رو میزان فضای مرده هیدرولیکی نقش مهمی در عملکرد حوضچه دارد. درصد فضای مرده هیدرولیکی به صورت کسر درصد فضای مؤثر از واحد تعریف می‌شود و به صورت رابطه (۷-۲) است.

$$\frac{V_d}{V} = 1 - e \quad (۷-۲)$$

۲-۷-۵ مسیر میان بر (اتصال کوتاه)

اتصال کوتاه پدیده ای پیچیده با تأثیرات قابل توجه بر عملکرد حوضچه است. این پدیده یکی از بزرگ-ترین موانع طراحی موفق حوضچه‌هاست (Persson 2000) که باعث ایجاد فضای مرده شده (Eddy 1979) و از کارایی حوضچه می‌کاهد. همچنین این پدیده عامل مهمی در پایین بودن بازده هیدرولیکی است.

اتصال کوتاه می‌تواند به عنوان جریان غیر ایده آل تعریف شود که به دلیل طراحی غلط رخ می‌دهد و باعث اختلاط ناکافی، ایجاد جریانات چگال در اثر اختلاف دمایی، جریانات چرخشی و انتشار محوری (در حوضچه‌های نهر گونه) می‌گردد.

شاخص اتصال کوتاه به صورت رابطه (۲-۸) تعریف می‌شود (Persson 2000, Metcalf 2003). اگر ماده ردیابی به حوضچه وارد شود:

$$SCI = \frac{t_{16}}{HRT} \quad (2-8)$$

در رابطه (۲-۸)، SCI شاخص اتصال کوتاه^۱، HRT زمان ماند تئوری و t_{16} زمان عبور ۱۶٪ از ماده ردیاب در خروجی حوضچه است. شدت اتصال کوتاه با افزایش مقدار SCI کاهش می‌یابد. در صورتی که شاخص اتصال کوتاه برابر با یک شود جریان درون حوضچه به جریان پلاگ درون راکتور نزدیک می‌گردد و هیچ مسیر میان بری درون حوضچه اتفاق نمی‌افتد.

۲-۷-۶ راندمان هیدرولیکی

از مهم‌ترین خصوصیات در طراحی حوضچه‌ها و همچنین مدیریت آن‌ها راندمان هیدرولیکی است. راندمان هیدرولیکی نشان‌دهنده نحوه اختلاط مناسب آب از نقطه نظر هیدرودینامیک جریان درون

¹ Short Circuiting Index

محیط آبی است. در مطالعات گذشته به منظور محاسبه راندمان هیدرولیکی جریان، از مقوله زمان ماند هیدرولیکی که بیانگر مدت زمان اقامت جریان درون حوضچه است، استفاده شد (Persson 1999). راندمان محاسبه شده از منحنی توزیع زمان ماند به عنوان نشانه‌ای از یکنواختی جریان داخل سیستم می‌باشد.

در واقع برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه از مفهوم راندمان هیدرولیکی استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۹-۲) است.

$$\lambda = \frac{t_p}{t_n} \quad (9-2)$$

که در آن t_p زمان رسیدن به حدکثر غلظت ردیاب و t_n زمان ماند تئوریک بر حسب روز است.

از نقطه نظر رژیم جریان هیدرولیکی، حوضچه‌ها در دو دسته نهرگونه و اختلاط کامل طبقه بندی می‌شوند. حوضچه نهرگونه یا پیستونی به حوضچه‌ای گفته می‌شود که جریان در آن به صورت طولی بوده و در جهت عمود بر مسیر جریان، اختلاطی روی نمی‌دهد و در صورتی که جرم محدودی از ردیاب به صورت لحظه‌ای وارد آن شود، بعد از گذشت زمان ماند باید در یک لحظه از حوضچه خارج شود. حوضچه اختلاط کامل حوضچه‌ای است که جریان ورودی به آن کاملاً اختلاط پیدا می‌کند. اگر جریان درون حوضچه به اختلاط کامل نزدیک شود جریان حاکم مشابه جریان پلاگ راکتور خواهد بود همچنین در این حالت حوضچه بهترین عملکرد هیدرولیکی را دارد.

۲-۸ مطالعات ردیاب انجام شده به صورت میدانی در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

ردیاب ماده یا انرژی است که توسط آب حمل شده و اطلاعاتی راجع به مسیر، جهت، سرعت، نرخ جریان آب و انتقال آلاینده‌ها به وسیله‌ی آب را ارائه می‌دهد. به دلیل قابل مشاهده بودن، رنگ‌ها کاربرد فراوانی به عنوان ماده ردیاب دارند. یکی از مشهورترین رنگ‌هایی که به عنوان ردیاب در مطالعات هیدرولیکی تأسیسات آب و فاضلاب استفاده می‌شود، رودامین است. رودامین علاوه بر قابلیت مشاهده بصری، به

خاطر عدم جذب در مطالعات پراکندگی استفاده می‌شود. در پژوهش لیزیما از رودامین به عنوان ماده ردیاب و از فلورومتر برای اندازه‌گیری غلظت ردیاب در خروجی استفاده شده است. فلورومتر کالیبره می‌شود. در واقع کالیبراسیون به طور موثر با کاهش غلظت زمینه (با ست کردن غلظت آب درون حوضچه بر روی صفر) انجام شده است (Lizima 2013).

به منظور تفسیر داده‌های ردیاب، اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی حوضچه ضروری است. بنابراین لیزیما با ثبت زمان از لحظه ورود جریان به سطل تا زمانی که سطل باید خالی شود و بعلاوه با داشتن حجم ذخیره شده در سطل، نرخ جریان را اندازه‌گیری کرد. این روند دوبار دیگر هم برای اندازه‌گیری دقیق نرخ جریان انجام شد (Lizima 2013).

رودامین Wt به عنوان ردیاب با غلظت $1 \frac{gr}{L}$ در مقطع ورودی حوضچه در مدت زمان ۱۷ دقیقه وارد شده است. با استفاده از یک برنامه زمانی، نمونه برداری از خروجی حوضچه برای محاسبه‌ی غلظت در خروجی انجام شد. منحنی به دست آمده از رسم مقدار ماده ردیاب در خروجی به ازای زمان‌های مختلف، منحنی پراکندگی زمان مانند حاصل شد. به عبارت دیگر، منحنی RTD میزان غلظت ماده ردیاب را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد (Lizima 2013).

۹-۲ بررسی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

با توجه به اهمیت و همچنین اقتصادی بودن استفاده از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب در این راستا مطالعات زیادی بر روی بهتر شدن عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب و افزایش راندمان آن‌ها انجام شده است که در این باره می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

وود^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۵ با توجه به این که روش‌های طراحی سنتی و مرسوم مشکلات هیدرودینامیکی از جمله مسیر میان بر (عبارت مسیر میان بر دارای تعریف دقیق و فنی نیست اما

¹ wood

معمولاً برای توصیف وضعیتی که در آن بخشی از جریان در زمان بسیار کم‌تر از زمان ماند خارج می‌شود، استفاده می‌گردد) را حل نمی‌کنند و قادر به پیش‌بینی تأثیر اقداماتی نظیر استفاده از دیوارهای میانی یا تغییر مکان موقعیت ورودی و خروجی برای بهبود عملکرد حوضچه‌ها نمی‌باشند. برای این منظور به بررسی هیدرودینامیک چهار سیستم حوضچه تثبیت فاضلاب با استفاده از نرم افزار FIDAP که یک برنامه CFD بر مبنای اجزا محدود است پرداخته شد. در این مطالعه حوضچه‌ها به صورت دو بعدی در حالت پایا با رژیم جریان آرام و در شرایط ایزوترمال شبیه‌سازی شد. در واقع پتانسیل CFD به عنوان یک ابزار طراحی جدید برای حوضچه‌های تثبیت فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. چهار حوضچه تثبیت فاضلاب به شرح ذیل؛ حوضچه بدون دیواره میانی، حوضچه با یک دیواره میانی در نزدیکی ورودی جریان، حوضچه با یک دیواره میانی در نزدیکی خروجی جریان، حوضچه با یک هوادهنده در مرکز حوضچه شبیه‌سازی شدند.

حوضچه‌ها به صورت دو بعدی به طوری که ورودی در گوشه بالایی سمت چپ و خروجی در گوشه پایینی سمت راست واقع شده شبیه‌سازی شدند. مناطق مرده به طور عمده در گوشه‌های مقابل ورودی و خروجی در حوضچه‌های بدون دیواره میانی ایجاد شد. دیواره میانی در نزدیکی ورودی باعث ایجاد جت مایع به سمت خروجی و افزایش حجم منطقه مرده در حوضچه می‌شود، که عمدتاً ناشی از تشکیل منطقه مرده و رکود در پشت دیواره میانی است. همچنین دیواره میانی که در نزدیکی خروجی قرار دارد مسیر میان‌بر ناشی از اثر جت را کاهش می‌دهد. (Wood, Greenfield et al. 1995).

با توجه به اینکه مدل‌های مرسوم حوضچه‌های تثبیت فاضلاب با مشکل عدم امکان پیش‌بینی عملکرد حوضچه‌ها مواجه‌اند، در مطالعه‌ای دیگر به مدل‌سازی دو بعدی CFD حوضچه‌های تثبیت فاضلاب پرداخته شد. در واقع اثر تنظیمات ورودی و خروجی مختلف در حوضچه مورد بررسی قرار گرفت. توزیع زمان ماند حاصل از مدل‌های دو بعدی CFD با توزیع زمان ماند آزمایشگاهی در مطالعات گذشته مقایسه شد. در یکی از سه هندسه شبیه‌سازی شده مدل دو بعدی با موفقیت توزیع زمان ماند

آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرد. با این حال الگوی جریان در دو هندسه دیگر به علت تفاوت در تعریف مقطع ورودی (قطر لوله، سرعت) در مدل با شرایط واقعی که به صورت سه بعدی است و همچنین حساسیت نتایج مدل‌سازی نسبت به فرضیات در نظر گرفته شده در مقطع ورودی که از هرگونه تأثیر عمق حوضچه صرف نظر شده است، به خوبی توصیف نشده است. همچنین نتایج نشان داد که مدل‌های دو بعدی CFD نمی‌توانند بدون بررسی یا آزمایش برای توصیف مناسب الگوهای هیدرودینامیکی در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب استفاده شوند (Wood, Howes et al. 1998).

تکستون و همکاران در سال ۱۹۸۷ با بررسی توزیع زمان ماند در حوضچه‌های کم عمق دریافتند که قوی‌ترین اثر بر روی راندمان هیدرولیکی حوضچه‌ها، نسبت میانگین زمان ماند به زمان ماند تئوری و نسبت طول به عرض خواهد بود. در نتیجه، براساس نتایج طراحان متوجه شدند تا چه میزان زمان ماند را افزایش دهند. همچنین مشاهده شد با استفاده از دیواره میانی نسبت طول به عرض می‌تواند افزایش یابد و اثرات نامطلوب باد را کاهش دهد، و پیشنهاد دادند که استفاده از دو دیواره میانی نسبت طول به عرض ۵-۱۰ را تولید می‌کند، که معمولاً مفید است (Thackston, Shields Jr et al. 1987).

در سال ۲۰۰۰ پرسون^۱ به ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی سیزده حوضچه با طرح‌های مختلف پرداخت و اثر موقعیت قرارگیری مقطع ورودی و خروجی، استفاده از دیواره میانی، نسبت طول به عرض و هندسه حوضچه و موقعیت قرارگیری خاکریز سطحی بر روی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌ها را مورد بررسی قرار داد. همچنین مسیرهای میان‌بر و پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نسبت طول به عرض، موقعیت ورودی و خروجی و خاکریزهای زیر سطحی (مانع در مقابل ورودی جریان) تأثیر زیادی بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌ها دارد. در این حالت‌ها یکی از مدل‌ها به گونه‌ای بود که پساب ورودی در کل عرض حوضچه وارد می‌شد که در این مورد شاخص اتصال کوتاه بیشتر از هندسه‌های دیگر محاسبه شده است. در حوضچه با هندسه غیر معمول

¹ persson

(L شکل - حوضچه منحنی) و یا با یک جزیره واقع در نزدیکی دیواره کناری آن، لزوماً منجر به کاهش کارایی هیدرولیک نسبت به اشکال اولیه نمی شود. همچنین نتایج نشان داد که یک جزیره در جلوی ورودی، عملکرد هیدرولیکی را افزایش می دهد. در واقع با افزایش نسبت طول به عرض، متوسط زمان ماند و مقدار حجم موثر افزایش می یابد و مناطق مرده کاهش می یابد (Persson 2000).

شیلتون^۱ در سال ۲۰۰۰ با توجه به این که استفاده از مدل های ریاضی دینامیک سیالات محاسباتی به طور قابل اطمینانی توانایی پیش بینی جریان سیال درون حوضچه را دارد و این ویژگی هیدرولیکی به عملکرد تصفیه فاضلاب مرتبط است، توانایی دینامیک سیالات محاسباتی را در طراحی حوضچه ها مورد بررسی قرار دادند. در واقع شبیه سازی CFD به طراحان حوضچه امکان تحقیق در مورد عملکرد هیدرولیکی برای طیف وسیعی از پیکربندی و سناریوهای طراحی را می دهد و به طور مستقیم برای پیش بینی کارایی تصفیه از نتایج شبیه سازی هیدرودینامیکی استفاده می شود. در این مطالعه حوضچه های به صورت سه بعدی و با استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ مدل سازی شدند. سپس اثرات اضافه کردن یک دیواره میانی به منظور چگونگی استفاده از CFD برای طراحی حوضچه ها مورد بررسی قرار گرفت (Shilton 2000).

بر اساس نتایج، گردابی^۲ بزرگ در حوضچه مشاهده شد، که تحت تأثیر پیکربندی ورودی، ایجاد شده بود. بزرگترین اثر دیواره میانی بر روی رفتار هیدرودینامیک، آسان نمودن اختلاط جریان بود. علاوه بر میدان سرعت سیال، پلات هایی از مصالحات عددی ردیاب ارائه شد. به طوری که از حرکت ردیاب شبیه سازی شده برای تولید منحنی توزیع زمان ماند هیدرولیکی بر اساس غلظت ردیاب از خروجی در زمان، استفاده می شود. بنابراین CFD می تواند به طور مستقیم برای پیش بینی کارایی تصفیه بر اساس نتایج شبیه سازی هیدرودینامیک حوضچه استفاده شود (Shilton 2000).

¹ shilton

² vortex

شیلتون و هریسون در سال ۲۰۰۳ به توسعه دستور العمل‌ها برای بهبود طراحی هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب پرداختند. با توجه به اینکه رفتار هیدرولیکی حوضچه‌ها تحت تأثیر پیکربندی موقعیت ورودی و خروجی، دیواره میانی و باد است. اما اطلاعات طراحی مربوط به این عوامل هنوز بسیار محدود است. در این مطالعه به مروری بر توسعه دستور العمل‌ها برای بهبود طراحی هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب پرداخته شد (Shilton and Harrison 2003).

براساس نتایج، طراحی ورودی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رژیم جریان در یک حوضچه داشته باشد. موقعیت نادرست ورودی و خروجی می‌تواند مشکلات هیدرودینامیکی از قبیل ایجاد مسیرهای میان‌بر را تشدید کند. به عنوان مثال از ماهیت کار انجام شده در این پژوهش، استفاده از یک لوله افقی کوچک واقع در ورودی در مقایسه با طراحی عمودی ورودی است. در این مطالعه، آزمایش‌های گسترده‌ای در طیف وسیعی از تنظیمات پیکربندی دیواره میانی انجام شده است. این پژوهش نشان داد که چگونه یک دیواره میانی کوتاه می‌تواند پیشرفت‌های مشابهی نسبت به دیگر طرح‌های مرسوم و طولانی دیواره میانی ارائه دهد و به طور بالقوه باعث صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌های ساخت دیواره میانی شود. برای طراحی دیواره میانی به شیوه مرسوم حداقل دو دیواره میانی توصیه می‌شود. برای مدل‌سازی حوضچه‌ها مشخص شد بیش از چهار دیواره میانی تنها به پیشرفت جزئی منجر می‌شود (Shilton and Harrison 2003).

ورودی عمودی می‌تواند وضعیت بهتری را نسبت به یک ورودی افقی ارائه دهد. با این حال ممکن است به دلیل ملاحظات بارگذاری و یا تأثیرات باد همیشه بهترین گزینه برای طراحی نباشند. اما بطور کلی پیشنهاد می‌شود، با توجه دقیق به الگوهای جریان شکل گرفته در حوضچه‌ها از لوله‌های افقی استفاده شود. کنترل بهتر جریان را می‌توان با طراحی ورودی هوشمندانه و استفاده از دیواره میانی به دست آورد. با توجه به اینکه موقعیت خروجی تأثیر کمی بر الگوی جریان اصلی دارد، بنابراین پس از طراحی موقعیت ورودی و دیواره میانی می‌تواند به عنوان یک عملکرد ثانویه در نظر گرفته شود که

برای رسیدن به حداکثر راندمان موقعیت خروجی می‌تواند در مناطق مرده خارج از الگوی جریان قرار گیرد (Shilton and Harrison 2003).

هدف اصلی شیلتون و هریسون در پژوهش خود ارائه برخی یافته‌های کلیدی در توسعه دستورالعمل‌ها، برای بهبود طراحی هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب است. این دستورالعمل‌ها برای کمک به علم در زمینه طراحی هیدرولیکی حوضچه‌ها تثبیت فاضلاب است. همان طور که توسط محققانی مانند وود و همکاران در سال ۱۹۹۵ برخی از آن‌ها شناسایی شده‌اند. با این وجود اعتقاد بر این است که توسعه این دستورالعمل‌ها سهم مهمی در پر کردن شکاف‌های علمی در این زمینه، تحقیقات بیشتر و ارائه ابزارهای عملی برای طراحی مهندسان که هنوز در این زمینه مورد نیاز است (Shilton and Harrison 2003).

شیلتون و همکاران در سال ۲۰۰۸ به مقایسه شبیه‌سازی ردیاب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و ردیابی ماده رنگی در دو حوضچه‌ی تثبیت فاضلاب در مقیاس واقعی و در مقیاس پایلوت در آزمایشگاه پرداختند. همچنین مدل شبیه‌سازی شده‌ی CFD را در مقایسه با مطالعات ردیاب در دو حوضچه یکی در مقیاس واقعی و دیگری با مقیاس ۱:۵ از همان حوضچه اما تحت شرایط کنترل شده در آزمایشگاه ارزیابی کردند. در حالی که شبیه‌سازی CFD ردیاب، دارای اختلافاتی با مدل واقعی بود اما در مقایسه با مدل آزمایشگاهی دارای شباهت خوبی بود. بررسی توسعه لایه لجن، جریان ورودی متغیر با زمان ناشی از تغییرات نرخ جریان ورودی، سرعت باد و درجه حرارت می‌تواند به نزدیک شدن هر چه بیشتر نتایج شبیه‌سازی CFD با داده‌های مطالعات ردیاب به صورت میدانی کمک می‌کند. با این حال در کاربرد عملی CFD که تغییراتی مانند کاربرد دیواره‌ی میانی موجب تغییرات زیادی در کارایی حوضچه می‌شود، می‌توان گفت یک مدل عملی اگر چه دقیق نیست اما می‌تواند بینش خوبی را برای طراحی ارائه دهد (Shilton, Kreegher et al. 2008).

در سال ۲۰۱۲ الوارادو^۱ و همکاران از مدل‌های محفظه بندی شده^۲ برای توصیف هیدرولیک در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب در مقیاس واقعی استفاده کردند. پیشرفت منابع تجربی و محاسباتی به استفاده از مدل‌های CFD به عنوان یک ابزار پیش‌بینی برای رفتار اختلاط در مقیاس کامل سیستم حوضچه‌های تثبیت فاضلاب کمک می‌کند. برای توصیف عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تکمیلی از سیستم حوضچه‌های تثبیت فاضلاب واقع در اکوادور استفاده شد که به صورت محفظه‌ای مدل‌سازی گردید (Alvarado, Sanchez et al. 2012a).

مدل‌های سه بعدی با داده‌های تجربی از آزمایش‌های ردیاب پالسی، سازگاری خوبی را نشان دادند. تعداد محفظه‌بندی‌ها با توجه به ویژگی‌های آشفتگی جریان، منحنی توزیع زمان ماند RTD و مولفه‌های سرعت غالب در مکان‌های مختلف حوضچه انتخاب شدند. ترتیب محفظه‌ها بر اساس معرفی جریان باز چرخش بین محفظه‌های مجاور است که به نوبه‌ی خود به ضریب پخش آشفتگی وابسته است. همچنین مدل‌های RTD شبیه‌سازی شده از سیستم مخازن سری^۳ (TIS) با مدل‌های محفظه بندی شده (CM) مقایسه شدند. براساس نتایج، TIS سازگاری خوبی با RTD اندازه گیری شده در آزمایشگاه نداشت، در حالی که مدل‌های محفظه بندی شده با حداقل اختلاف نقاط اوج در آزمایش ردیاب را نشان می‌دهد. نتایج TIS و CM نشان داد، با توجه به تفاوت شدید در بارهای خروجی، بهتر است روش CM برای مدل‌سازی بیولوژیکی سیستم در مقیاس کامل مورد استفاده قرار گیرد (Alvarado, Sanchez et al. 2012a).

الوارادو و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به تجزیه و تحلیل انباشت لجن و همچنین تأثیر آن بر روی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب پرداختند. با توجه به اینکه مدیریت انباشت لجن در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب برای حفاظت از عملکرد سیستم امری

¹ Alvarado

² Compartmental Modell

³ Tank in serie

ضروری است و همچنین الگوهای انباشت لجن به شدت بر راندمان تصفیه حوضچه اثر می‌گذارند، از این رو از مدل سازی CFD برای بررسی رابطه‌ی بین پروفیل سرعت و انباشت لجن در طی ده سال بهره‌برداری از حوضچه تثبیت فاضلاب در اکوادور استفاده کردند. آزمایشات ردیاب انجام شد و سه حالت انباشت لجن بر اساس اندازه‌گیری‌های بیومتریکی شبیه سازی شد. تجزیه و تحلیل توزیع زمان ماند نشان دهنده‌ی کاهش زمان ماند در اثر انباشت لجن است. محاسبه نرخ انباشت لجن و بررسی تاثیر الگوی جریان بر انباشت لجن، امکان برنامه‌ریزی بهتر برای عملکرد حوضچه‌های آتی برای آزمایش سناریوهای مختلف انباشت لجن را فراهم می‌کند (Alvarado, Sanchez et al. 2012b).

بر اساس نتایج انباشت لجن در حوضچه‌های اختیاری از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب اکوامبا رفتار مشابهی را با دیگر سیستم‌های حوضچه تثبیت گزارش شده در مطالعات گذشته، نشان داد. و اثر مدل سازی CFD در ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی سیستم‌ها تحت تاثیر تجمع حجم زیادی از لجن بررسی شد، تجزیه و تحلیل الگوی انباشت لجن در رابطه با اثر هیدرودینامیک نشان داد که منحنی زمان ماند تحت تاثیر قرار گرفته است. رفتار منحنی RTD به دست آمده با CFD به طور معمول در سیستم‌هایی مشاهده می‌شود که یک الگوی باز چرخشی قوی دارند. نتایج مدل‌های CFD به طور قابل توجهی تحت تاثیر بررسی تقریبی انباشت لجن است که در نتیجه بر هندسه حوضچه تاثیر می‌گذارد. ساده سازی در مدل‌های CFD مانند بررسی سیال با خواص فیزیکی برابر با آب، نادیده گرفتن اثرات شرایط محیطی، شرایط جریان ورودی و تقریب هندسه واقعی برای مدل سازی، از دلایل اصلی تفاوت بین نتایج CFD و نتایج به دست آمده در کارهای آزمایشگاهی است. به طوری که در مطالعه‌ی آنها سازگاری خوبی بین منحنی زمان ماند به دست آمده در کارهای آزمایشگاهی و مدل سازی CFD وجود نداشت. به طوری که نقاط اوج RTD به دست آمده از CFD در نتایج آزمایشگاهی قابل مشاهده نبود بنابراین با اصلاحات مدل و یک مدل دقیق از توپولوژی انباشت لجن می‌توان گامی در راستای سازگاری بهتر نتایج با نتایج آزمایشگاهی برداشت (Alvarado, Sanchez et al. 2012b).

پاسوس^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴ با توجه به این که شناخت رفتار هیدرولیکی در تعیین خصوصیات حوضچه تثبیت فاضلاب بسیار مهم است، به ارزیابی هیدرودینامیک حوضچه‌های اختیاری در مقیاس واقعی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین اندازه‌گیری‌های میدانی پرداختند. خصوصیات هیدرودینامیکی را با انجام اندازه‌گیری‌های ردیاب توسط پخش رنگ و یک دروگ^۲ در مطالعات میدانی و شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پیش‌بینی کردند. یک مدل سه‌بعدی CFD خطوط جریان، درجه پرکندگی، مناطق مرده و مسیرهای میان‌بر در حوضچه را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن اطلاعات در مورد جریان واقعی در حوضچه، از ردیابی دروگ، پراکندگی و پخش رنگ و اندازه‌گیری باد استفاده شد تا به عنوان وسیله‌ای برای ارزیابی صحت عملکرد مدل CFD مورد استفاده قرار گیرد. آزمایش ردیاب، میانگین زمان ماند هیدرولیکی و شرایط اختلاط در حوضچه مورد مطالعه پاسون و همکاران را برآورد کرد و مدل محاسباتی CFD مطابقت خوبی با مطالعات میدانی داشت. مسیر ثبت شده توسط دروگ مطابق با مشاهدات میدانی بود. مقاطع ورودی و خروجی جریان، مناطق مرده و مناطق باز چرخش با سرعت کم، جزء مناطقی محسوب می‌شوند که لجن بیشتری در آنجا انباشته می‌شود. براساس ردیابی‌های انجام شده در مطالعات میدانی بدیهی است که مدل CFD رفتاری کاملاً مشابه با مشاهدات میدانی داشته است. بنابراین CFD می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی برای ارزیابی و بهبود هر چه بیشتر هیدرولیک حوضچه مورد استفاده قرار گیرد، اگرچه برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر صحت سنجی مدل الزامی است (Passos, von Sperling et al. 2014).

در سال ۲۰۱۲ لیزیم^۳ عملکرد هیدرولیکی سیستم حوضچه‌ی تثبیت فاضلاب واقع در بولیوی مورد بررسی قرار داد. او علاوه بر آزمایشات میدانی ردیاب در حوضچه، آن را نیز به صورت دو بعدی مدل‌سازی کرد. با توجه به اینکه این حوضچه در سال ۲۰۰۶ به بهره‌برداری رسیده است بنابراین هیچ

^۱ passos

^۲ drogue

^۳ Lizima

لجنی در آن انباشته نشده بود. او در سال ۲۰۱۲ به برآورد حجم لجن انباشته شده در حوضچه پرداخت. سپس با مقایسه مدل سازی این دو حالت به نتایج ذیل دست یافت. با توجه به اینکه انباشت لجن ظرفیت تصفیه را کاهش می دهد اما اثرات دیواره میانی را ایجاد کند که باعث می شود رفتار جریان به جریان پلاگ^۱ راکتور نزدیک شود و در نتیجه کارایی تصفیه افزایش یابد در واقع نتایج بدست آمده از کار وی اهمیت دیواره میانی را نشان می دهد (Lizima 2013).

اودراگو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر لایه ی لجن بر روی عملکرد هیدرولیکی حوضچه های تثبیت فاضلاب پرداختند. با توجه به اینکه بهبود عملکرد هیدرولیکی حوضچه های تثبیت فاضلاب علاوه بر حفظ سلامت محیط زیست منجر به دست یابی به یک منبع آب پایدار، از پساب تصفیه شده جهت استفاده در کشاورزی و دیگر مصارف می گردد. بنابراین برای استفاده مجدد از پساب حوضچه های تثبیت فاضلاب درک بهتر از عوامل موثر بر عملکرد هیدرولیکی سیستم مورد نیاز است. یکی از عوامل تاثیر گذار بر حوضچه های تثبیت فاضلاب انباشت لجن است که حجم حوضچه را تغییر می دهد. اگر چه انباشت لجن ظرفیت تصفیه را کاهش می دهد اما ممکن است اثرات دیواره ی میانی را ایجاد کند که باعث می شود رفتار جریان به جریان پلاگ راکتور نزدیک شود. در نتیجه کارایی تصفیه افزایش می یابد. در این مطالعه چهار حوضچه تثبیت فاضلاب با حجم و توزیع لجن مختلف مورد بررسی قرار گرفت، تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی اثر شکل لایه لجن بر روی عملکرد هیدرولیکی حوضچه های اختیاری که معمولاً در بسیاری از جوامع کوچک و در حال توسعه در سراسر جهان استفاده می شوند، انجام شد. نتایج نشان داد که توزیع و حجم لجن تاثیر قابل ملاحظه ای در کارایی و ظرفیت تصفیه فاضلاب دارد. در واقع نتایج بدست آمده در این مطالعه اهمیت کاربرد دیواره میانی را نشان می دهد (Ouedraogo, Zhang et al. 2016).

¹ plug

² Ouedraogo

۲-۱۰ معرفی نرم افزار OpenFOAM

دینامیک سیالات محاسباتی شاخه‌ای از مکانیک سیالات است که به حل عددی جریان سیال می‌پردازد. مهم‌ترین نرم‌افزار متن‌باز در این حیطه OpenFOAM می‌باشد. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی هر نوع مسأله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسائل ساده تا بسیار پیچیده است. این نرم‌افزار توسط OpenCFD Ltd تحت مجوز عمومی گنو^۱ ایجاد شده به علاوه به علت آزاد بودن منبع، امکان بررسی تمام جنبه‌های کدنویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کاربر فراهم خواهد بود. قدرت اصلی OpenFOAM ناشی از استفاده‌ی هوشمندانه از توانایی‌های زبان برنامه نویسی C++ است. این زبان برنامه نویسی شی‌گرا^۲ است. هسته انعطاف‌پذیر و کارآمد OpenFOAM از مجموعه‌ای از کدهای نوشته‌شده به زبان C++ ایجاد شده است. این مجموعه‌ها در ایجاد حل‌گرهایی^۳ برای مدل‌سازی مسائل مطرح در مهندسی مکانیک و با ایجاد ابزارهایی برای اعمال پیش‌پردازش و پس‌پردازش، همچنین به وجود آوردن کتابخانه‌هایی به منظور ایجاد جعبه‌ابزارهایی که در حل‌گرها قابل دسترسی باشند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار با تعدادی حل‌گر از پیش‌ساخته، مثال‌های کاربردی و کتابخانه ارائه کرده است که می‌تواند به عنوان یک بسته مدل‌سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار حل‌گرها، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها نیز وجود دارد. نرم‌افزار OpenFOAM از روش عددی حجم محدود برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند که در آن به هر شبکه بندی غیر ساختار یافته سه‌بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده می‌شود. در این نرم‌افزار برای حل جریان سیال از الگوهای تکرار سرعت- فشار ضمنی استفاده می‌شود. موازی‌سازی در حل و بخش‌بندی دامنه‌ی حل از مبانی به کار رفته در OpenFOAM است. بنابراین به طور کلی حل‌گرها بدون نیاز به کدنویسی خاصی برای حل موازی قابل توسعه می‌باشند.

¹ GNU

² Object-Oriented

³ Solvers

فصل سوم

روش شناسی تحقیق

۳-۱ مقدمه

به منظور بررسی جزئیات مطرح شده در یک پژوهش، نیاز است که موقعیت و هندسه حوضچه مورد مطالعه بعلاوه مشخصات سیستم محاسباتی به کار رفته، دلایل استفاده از هر کدام و همچنین روش‌های نظریه‌ای استفاده شده در پژوهش به تفصیل بیان شود. از این رو در این فصل با بیان روش‌شناسی تحقیق، اطلاعات مورد نیاز برای بررسی و درک دقیق‌تر نتایج به دست آمده ارائه شده است.

در این بخش ابتدا به مطالعه سیستم حوضچه تثبیت فاضلاب و موقعیت مکانی آن پرداخته می‌شود. در بخش بعدی سیستم محاسباتی به کار رفته جهت مدل‌سازی حوضچه مذکور معرفی شده است. با توجه به این که از نرم‌افزار OpenFOAM جهت شبیه‌سازی استفاده گردید، از این رو در این بخش به معرفی این نرم‌افزار و انجام تنظیمات مربوط به سه گام پیش‌پردازش، پردازش، پس‌پردازش، انتخاب حل‌گر مناسب جهت حل جریان و شبیه‌سازی مطالعات ردیاب و روش حل معادلات توسط آن پرداخته می‌شود. در قسمت بعدی رژیم جریان بر اساس عدد رینولدز بررسی شده است و مقدمه‌ای از آشفتگی ارائه خواهد شد. در قسمت بعدی به روش‌های حل معادلات آشفتگی و مدل آشفتگی استفاده شده در این پژوهش و همچنین تابع دیوار پرداخته شده است.

۳-۲ سیستم حوضچه مورد مطالعه

یکی از متداول‌ترین روش‌های تصفیه فاضلاب استفاده از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب است. به طور گسترده استفاده از حوضچه‌های بی‌هوازی، اختیاری^۱ و تکمیلی^۲ در دهه‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است (Mara and Pearson 1987). سیستم حوضچه مورد مطالعه در این پژوهش در روستای سن آنتونیو^۳ واقع در بولیوی^۴ است. این حوضچه برای ۷۲۷ نفر جمعیت طراحی شده است. به طوری که

^۱ Facultative

^۲ Maturation

^۳ San Antonio

^۴ Bolivia

شامل یک حوضچه اختیاری و دو حوضچه تکمیلی است بعلاوه در یک مجموعه به صورت سری قرار گرفته اند و توسط یک کمیته محلی انتخاب شده، مدیریت می‌شوند. میانگین نرخ جریان ورودی به حوضچه $60 \frac{m^3}{day}$ است. این پژوهش بر روی حوضچه اختیاری این سیستم انجام شده است، این حوضچه در سال ۲۰۰۶ با ابعاد $49.6 \times 27.5 \times 1.8$ طراحی و به بهره برداری رسیده است. هیچ دیواره میانی در سیستم جهت کنترل و هدایت جریان از ورودی به خروجی طراحی نشده است. جهت تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی هیدرولیک این حوضچه تثبیت فاضلاب، مطالعات زیادی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است که شامل ارزیابی عملکرد هیدرولیکی بر اساس انباشت لجن در اعماق حوضچه بوده است (Lizima 2013, Verbyla, Oakley et al. 2013a, Verbyla, Oakley et al. 2013b, Ouedraogo, et al. 2016).

بر اساس نتایج به دست آمده توسط محققان ثابت شده است که مدل‌های CFD یک ابزار قابل اطمینان در زمینه تصفیه فاضلاب با استفاده از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب می‌باشند. همچنین این مدل‌ها به درستی الگوی جریان در داخل حوضچه تثبیت فاضلاب را به صورت کیفی شبیه‌سازی می‌کنند (Wood, Greenfield et al. 1995, Wood, Howes et al. 1998, Peterson, Harris et al. 2000, Shilton 2000, Alvarado, Sanchez et al. 2012, Alvarado, Vedantam et al. 2012, Ouedraogo, Zhang et al. 2016).

در این پژوهش به بررسی عملکرد هیدرولیکی در اثر تعبیه توزیع کننده‌های عمقی در کف حوضچه اختیاری مذکور پرداخته می‌شود، با توجه به خواص میکرونانو حباب‌ها و مطالب ارائه شده در فصل دوم، میکرونانو حباب‌ها نیاز به اکسیژن که فاکتور بسیار مهمی در تصفیه فاضلاب با استفاده از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب است را تأمین می‌کنند، بنابراین با پخش میکرو نانو حباب توسط توزیع کننده‌های تعبیه شده در کف حوضچه انتظار می‌رود که مومنتوم و اختلاط در جریان بیشتر گردد و از ایجاد مناطق رکود در حوضچه ممانعت شود و به طور کلی پخش یکنواخت‌تر جریان تاثیر مستقیم بر عملکرد هیدرولیکی را به همراه داشته باشد.

۳-۳ سیستم محاسباتی مورد استفاده در این پژوهش

جهت مدل سازی حوضچه های تثبیت فاضلاب از نرم افزار OpenFOAM نسخه ی 5 و از نرم افزار ParaView نسخه ی 5.0.1 برای پس پردازش در این برنامه استفاده شده است. همچنین جهت اجرای این نرم افزارها، سیستم عامل Ubuntu 14.04 LTS و پکیج Mate Desktop Environment 1.12.1 بر روی رایانه ای با مشخصات جدول ۳-۱ به کار گرفته شده است.

جدول ۳-۱- مشخصات رایانه ی استفاده شده در این پژوهش

مشخصات	قطعه ی سخت افزاری
Intel Xeon 2695	پردازشگر
256 GB	حافظه
Gallium 0.4 on llvmpipe	کارت گرافیک

۳-۴ نرم افزار OpenFOAM

در این پژوهش برای بررسی رفتار هیدرولیکی جریان داخل حوضچه از نرم افزار این فوم استفاده شده است. این نرم افزار بر مبنای روش حجم محدود است. در روش حجم محدود، دامنه ی حل با استفاده از شبکه ی محاسباتی به سلول هایی که هر یک از آن ها یک حجم کنترل است، تقسیم می شود. متغیرهای وابسته در مرکز حجم ها (سلول ها) یا در گوشه ی آن ها محاسبه می شوند. زمان نیز در حالت جریان های گذرا به تعدادی گام زمانی تقسیم می گردد و کل مدت زمان از ابتدا تا انتهای زمان حل را پوشش می دهد. براساس ویژگی های این نرم افزار می توان گفت که فرآیند حل یک مسأله در نرم افزار OpenFoam شامل سه مرحله است. این سه گام ضروری و لازم در مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی پیش پردازش^۱،

¹ pre processing

پردازش^۱ و پس پردازش^۲ را شامل می گردد، به طوری که این سه گام در پژوهش حاضر به ترتیب به وسیله blockMesh، OpenFoam، ParaViwe اجرا شده است.

۳-۴-۱ پیش پردازش

BlockMesh در نرم افزار اپن فوم برای ساخت هندسه و مش زنی، در نظر گرفته شده است. در این بخش اطلاعات ورودی مسأله به وسیله یک رابط خوب یعنی blockMesh گرفته شده و تبدیل به اطلاعات به شکل مناسب برای حل کننده شده است. عملیاتی که در مرحله پیش پردازش در فایل blockMeshDict انجام شده است به شرح زیر است:

- تعریف هندسه ی مسأله مورد نظر: محدوده محاسبات^۳
در این قسمت، محدوده محاسباتی در فایل blockMeshDict به صورت مختصات رأس در قسمت Vertices تعریف می شود، هریک از رأس ها مقادیری را در راستای محورهای مختصات X، y و Z به خود اختصاص می دهند. هر چهار رأس یک Patch و هر هشت رأس یک block، سه بعدی را شامل می شود.
- ایجاد شبکه در واقع جزء کردن محدوده به یک سری اجزا کوچکتر
بدین منظور بعد از تعریف کردن هندسه به صورت بلوک، هر بلوک در سه راستای اصلی به شبکه ای از حجم های محدود تقسیم بندی شده است.
- تعیین شرایط مرزی مناسب برای حجم های محدود
صفحات مرزی در قسمت Patches تعریف شده است هر صفحه مرزی توسط چهار رأس تعیین می گردد. در این قسمت ابتدا نوع شرط مرزی برای هر مرز تعریف و سپس آن مرز مطابق هندسه مسأله نام گذاری می گردد. برای دیوارهای ثابت و مرزهای بسته حوضچه، نوع شرط

¹ run

² post processing

³ Computational domain

مرزی wall انتخاب شده است، زیرا در آن‌ها هیچ‌گونه ورودی و خروجی جریان وجود ندارد. در مقاطع ورودی و خروجی جریان بعلاوه در محل تزریق از روزنه‌ها از نوع شرط مرزی patch استفاده شده و همچنین برای حل جریان دو بعدی شرط مرزی empty به کار گرفته شده است. به طور کلی هر دستگاه معادله دیفرانسیلی دارای تعداد نامحدودی جواب است. آنچه که جواب را یگانه می‌کند، تعیین شرایط اولیه و مرزی مناسب است. در حال حاضر تحقیقات و سیمی در مورد مسائل مربوط به تعیین شرایط مرزی و آثار آن در پایداری و دقت جواب در جریان است. برای اینکه شرایط مرزی مناسبی را تعریف کنیم، نکات زیر را باید در نظر گرفته شود:

- فیزیک یک مسأله باید درست مدل شود. به عنوان مثال، در جریان لزج، شرط عدم لغزش را بر روی سطح باید اعمال شود.
- شرایط فیزیکی باید با عبارت‌های ریاضی درستی بیان شوند.
- ممکن است شرایط مرزی عددی اضافی مورد نیاز باشد. این شرایط مرزی را معمولاً از برونیابی جواب‌های داخل قلمرو حاصل می‌شود.

بنابراین در این مرحله فایل‌های مربوط به شرایط اولیه مسأله، شامل هندسه، محدوده‌ی محاسباتی و شرایط مرزی حاکم بر مسأله، مطابق با جزئیات ذیل تنظیم شد:

در این پژوهش چهار هندسه در نظر گرفته شده است. هندسه اول مربوط به تحقیقات پیشین توسط (Lizima 2013) که جهت اعتبار سنجی نتایج از آن استفاده شده است. این حوضچه فاقد لجن و یا توزیع کننده عمقی است و توصیف جریان در سیستم مختصات دکارتی (x,y,z) صورت گرفته است، که محور x هم تراز با جهت جریان، محور z موازی با ارتفاع حوضچه و محور y عمود بر سایر محورها است. در این هندسه، طول در جهت x برابر با 49.6m، عرض حوضچه در جهت y برابر با 27.5m و ارتفاع مخزن در جهت z برابر با 1.8 m و بالاترین سطح مخزن در معرض سرعت ثابت جریان آزاد واقع شده است. سطح مقطع ورودی و خروجی جریان 0.25 m^2 در ارتفاع 0.85m تا 1.35m واقع شده است.

فرض بر این است که رفتار سیال درون مخزن نیوتنی است. شرایط آن هم دما، سیال غیر قابل تراکم و جریان حاکم در مخزن در حالت پایا با رژیم جریان آشفته است. که به صورت دو بعدی مدل سازی شد. هندسه دوم مربوط به حوضچه با توزیع کننده های عمقی یک اینچی در کف مخزن با فواصل 6.2m در طول و 5.4m در عرض و به صورت کاملاً متقارن تعبیه شده به طوری که در کف مخزن ۲۸ روزنه قرار گرفته است و دبی اختصاص یافته به مجموع روزنه ها ۱۰٪ دبی ورودی به مخزن یعنی ۶ مترمکعب در روز بوده است که با توجه به جریان در روزنه ها در راستای Z اعمال می شود این هندسه به صورت سه بعدی مدل سازی گردیده است.

تمام شرایط حاکم بر هندسه دوم در هندسه سوم هم صدق می کند با این تفاوت که در این هندسه آرایش توزیع کننده ها متفاوت است توزیع کننده ها در راستای طولی با فواصل 4.1m و در راستای عرض حوضچه با فواصل 4.56m در کف حوضچه واقع شده اند، بنابراین در این حالت ۵۵ روزنه در کف قرار گرفته است.

در هندسه چهارم تراکم توزیع کننده ها بیشتر بوده به طوری که فاصله آن ها از هم، در طول حوضچه 2.9m و در عرض حوضچه 2.48m است و در مجموع ۱۶۰ روزنه در کف تعبیه شده است.

۳-۴-۲ پردازش

این بخش شامل تمامی تنظیمات قبل از حل مسأله است.

جریان حاکم در حوضچه پایا و آشفته است، بنابراین از معادله های RANS^۱ (معادله های متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال) استفاده شده است. ایده ی تشکیل دهنده ی این معادله ها، تجزیه ی رینولدز است که به وسیله ی آن یک مقدار لحظه ای، به مقادیر متوسط زمانی و نوسانی خود تجزیه شده است. این معادلات جهت مدل سازی جریان در مخازن تصفیه آب و فاضلاب به کار گرفته شده اند (Zhang et al. (2014b), Zhang et al. (2014a), al. (2013)). بعلاوه به منظور مدل سازی جریان آشفته

¹ Reynolds Average Navier Stokes Equations

در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب می‌توان از مدل‌های مختلف آشفتگی که در کتابخانه نرم‌افزار OpenFOAM موجود است، استفاده کرد. محققان زیادی با استفاده از مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ به مدل سازی جریان در حوضچه‌های تثبیت فاضلاب پرداخته‌اند (Alvarado et al. 2012, Lizima 2013, Ouedraogo, Zhang et al. 2016). بنابراین برای حل معادله‌های متوسط گیری شده ناویه استوکس RANS از مدل توربولنسی $k - \varepsilon$ استاندارد در این پژوهش استفاده شده است (Wilcox 1998).

سیال مورد استفاده طبق مقاله آزمایشگاهی مرجع، آب ۲۰ درجه سیلسیوس با فرض تراکم ناپذیری و خصوصیات فیزیکی ثابت (با چگالی $998.2 \frac{kg}{m^3}$ و ویسکوزیته $1.003 \times 10^{-3} \frac{kg}{m.s}$) در نظر گرفته شد (Wood, Greenfield et al. 1995).

با توجه به مشخصات جریان برای حل مسأله از میان حل‌گرهای موجود در کتابخانه نرم‌افزار OpenFoam حل‌گر SimpleFoam استفاده شده است. تنظیمات قبل از حل شدن مسأله در فایل controlDict انجام می‌شود که شامل زمان شروع پردازش از لحظه‌ی صفر تا زمان پایان برابر با زمان ماند تئوریک حوضچه $(\frac{V}{Q})$ است. پس از تنظیم سایر پارامترها در این قسمت، مسأله داده شده در قسمت قبلی حل می‌شود و با حل شدن مسأله اقدام به گرفتن اطلاعات لازم از نرم‌افزار می‌گردد. داده‌های تهیه شده توسط نرم‌افزار OpenFoam به صورت خام بوده و گرافیکی نیستند بدین منظور برای اطلاعات گیری گرافیکی به راحتی می‌توان از قسمت پس پردازش استفاده نمود.

۳-۴-۳ پس پردازش

در مسأله حاضر از نرم افزار ParaViwe جهت نمایش هندسه و مش، نمایش برداری^۱، نمایش کانتوری^۲، نمایش سطوح بشکل دو بعدی و سه بعدی و استخراج مقادیر غلظت در خروجی حوضچه استفاده شده است.

¹ vector plots

² contour plots

۳-۵ جزئیات حل گر انتخابی

در پژوهش حاضر فایل اصلی انتخاب شده از حل گر simpleFoam شامل سه زیر مجموعه 0، constant و system است.

فایل 0 مبین شرایط اولیه و شرایط مرزی مسأله می باشد. در پوشه constant، خواص فیزیکی سیال مورد نظر به علاوه آرام و آشفته بودن رژیم جریان و مدل آشفتگی تعریف می شود. فایل system شامل پنج زیر مجموعه به صورت فایل های blockMeshDic، controlDict، decomposeParDic، fvSolution، fvScheme است که به ترتیب هرکدام برای تنظیمات زیر تعریف شده اند:

۳-۵-۱ فایل blockMeshDic

در این فایل، شبکه مسأله، نام گذاری مرزها و انتخاب نوع شرط مرزی انجام می شود.

۳-۵-۲ فایل controlDict

تنظیمات مربوط به کنترل حل مانند زمان شروع و پایان حل، اندازه گام تکرار و گام زمانی برای خروجی به علاوه روش ذخیره اطلاعات حل در این فایل انجام می شود.

۳-۵-۳ فایل decomposeParDic

در این فایل چگونگی تقسیمات شبکه و اطلاعات موجود در نمونه، به منظور پردازش به صورت موازی تعریف می شود.

۳-۵-۴ فایل FVSolution

همه تنظیمات مربوط به حل گر، مقادیر باقیمانده، تعداد تکرارها، میزان خطا و مقداری خطای نسبی و همچنین نحوه حل دستگاه معادلات خطی برای هر یک از میدان های متغیر شامل سرعت و فشار در

این فایل مشخص می‌شود بنابراین در ادامه به بیان روش حل میدان‌های سرعت و فشار پرداخته و الگوریتم‌های حل در این فوم به اختصار شرح داده شده‌اند.

روش حل میدان‌های سرعت و فشار

مشکلات مربوط به حل میدان‌های سرعت و فشار شامل عبارت‌های جابجایی در معادله مومنتوم و کوپل پیچیده سه معادله مومنتوم و نقش فشار می‌باشد. فشار در همه معادلات مومنتوم ظاهر می‌شود در حالی که معادله‌ای برای آن وجود ندارد. در جریان‌های تراکم‌پذیر، معادله پیوستگی می‌تواند به صورت معادله انتقالی برای چگالی استفاده شود و معادله انرژی یک معادله انتقالی برای دما محسوب می‌شود. با استفاده از این دو معادله و معادله حالت ($P = p(\rho, T)$) فشار محاسبه می‌گردد.

در حالی که در جریان‌های تراکم‌ناپذیر، چگالی ثابت و به فشار ارتباطی ندارد. در این جریان‌ها کوپل بودن بین فشار و سرعت، محدودیت برای حل میدان جریان ایجاد می‌کند. مشکل غیر خطی بودن دسته معادلات کوپل فشار و سرعت به وسیله روش تکرار شامل الگوریتم سیمپل حل می‌گردد. محاسبات الگوریتم سیمپل با یک میدان فشار حدسی شروع می‌شود، این میدان فشار حدسی در معادلات مومنتوم گسسته‌سازی شده، به منظور تولید مقادیر اولیه برای میدان سرعت به کار گرفته می‌شود. فشارها و مولفه‌های سرعت به وسیله مقادیر تکرارهای بعدی اصلاح و سپس توسط معیار پایداری چک می‌شوند.

الگوریتم سیمپل¹ SIMPLE برای حل جریان

الگوریتم سیمپل، معادله‌های ناویه-استوکس را با یک روش تکرار به هم وصل می‌کند. مراحل این الگوریتم به صورت زیر است (Bergman 2012)

- اعمال شرایط مرزی
- حل معادله‌ی مومنتوم گسسته شده، به منظور محاسبه‌ی میدان سرعت میانی
- محاسبه‌ی شار جرمی در وجوه سلول‌ها

¹ Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equation

- حل معادله‌ی فشار
- تصحیح شار جرمی در وجوه سلول‌ها
- تصحیح سرعت‌ها در میدان فشار جدید
- به روز رسانی شرایط مرزی
- تکرار مراحل بالا تا زمام همگرایی

الگوریتم پیزو PISO¹ برای جریان گذرا

در الگوریتم پیزو عملیات کوپل کردن فشار و سرعت در سه گام اصلی انجام می‌پذیرد (Bergman 2012)

- گام پیش‌بینی مومنتوم که در آن آخرین جواب به دست آمده، برای فشار و حل معادله‌ی مومنتوم و در نتیجه به دست آوردن یک فرض مناسب برای فشار استفاده می‌شود. در این مرحله معادله‌ی پیوستگی را ارضا نمی‌کند.
 - مرحله‌ی حل فشار، که ماتریس متعلق به معادله‌ی فشار تشکیل داده می‌شود و سپس حل می‌شود تا تخمینی جدید برای فشار را به دست آورد.
 - گام اصلاح صریح سرعت که در آن فشار به دست آمده برای محاسبه‌ی شارهای حجمی بقائی و بازسازی سرعت‌های موجود در میدان فشار جدید استفاده می‌شود.
- سرعت تنها به میدان فشار بستگی ندارد بلکه به آخرین سرعت به دست آمده در سلول‌های همسایه نیز بستگی دارد، بنابراین دو گام آخر حلقه‌ی پیزو آن قدر تکرار می‌گردند تا یک دقت مورد قبول حاصل گردد.

¹ Perssure Implicit With Split Opreator

الگوریتم پیمپل^۱ برای حل جریان

الگوریتم پیمپل از ترکیب دو الگوریتم پیزو و سیمپل حاصل می‌شود. در واقع الگوریتم پیمپل دو حلقه تصحیح کننده را به کار می‌گیرد؛ حلقه درونی و حلقه بیرونی. تصحیح کننده بیرونی در واقع الگوریتم سیمپل است و حلقه تصحیح کننده درونی الگوریتم پیزو می‌باشد. الگوریتم سیمپل یک الگوریتم مناسب برای جریان‌های دائم می‌باشد، اما الگوریتم پیزو یک روش محاسبه سرعت- فشار است که اساساً برای محاسبه جریان‌های گذرا در هر دو حالت تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر به کار می‌رود. لذا الگوریتم پیمپل که ترکیبی از این دو الگوریتم می‌باشد، یک روش حل مناسب برای جریان‌های تراکم‌پذیر گذرا است. در نرم‌افزار OpenFOAM کاربر می‌تواند تعداد حلقه‌های تصحیح کننده درونی و بیرونی را مشخص نماید. معمولاً هر دو آن‌ها روی عدد ۲ تنظیم شده‌اند، به این معنی که الگوریتم پیمپل، دو حلقه سیمپل را اجرا می‌کند و در خلال آن‌ها دو تصحیح کننده فشار پیزو اعمال می‌گردد.

در پژوهش حاضر برای حل جریان از حل‌گر simpleFoam و برای پخش و ردیابی غلظت از حل‌گر fvSolution scalarTransportFoam استفاده شده است. در این دو حل‌گر الگوریتم سیمپل در فایل fvSolution برای حل میدان متغیرها بکار برده شده است.

۳-۵-۵ فایل fvScheme

نحوه‌ی گسسته‌سازی هر یک از عمل‌گرهای دیفرانسیلی از قبیل گرادیان، دیورژانس، لاپلاسین و کرل را می‌توان در این فایل تعیین نمود.

هدف از هر گسسته‌سازی تبدیل یک یا چند معادله‌ی دیفرانسیلی به یک دستگاه مشابه از معادلات جبری است. حل این دستگاه، مقادیری مشابه با مقادیر به دست آمده از حل معادلات عمومی، در بعضی موقعیت‌های تعیین شده در مکان و زمان، وضعیت مطلوبی ایجاد می‌کند.

¹ Pimple

روش گسسته‌سازی در OpenFOAM، روش حجم محدود است این روش شامل سه گام اصلی که عبارتند از: تبدیل فضا، زمان و معادلات انتقال به فرم گسسته شده، می‌باشد. در این روش دامنه فیزیکی به تعدادی حجم کوچک (سطح برای موارد دوبعدی) تقسیم شده و متغیرهای وابسته در مراکز حجم‌ها محاسبه می‌شوند. مزیت‌های روش حجم محدود این است که به سبب حل شکل انتگرالی معادله‌های حاکم، بقای جرم، مومنتوم و انرژی به طور خودکار حفظ می‌شود (اندروساندرسون، د، مکانیک شارها و انتقال گرمای محاسباتی، ترجمه ابراهیم شیرانی)،

در پژوهش حاضر تنظیماتی که برای حل جریان و گسسته‌سازی معادلات انجام شده است در جدول ۲-۳ به طور خلاصه بیان شده است.

جدول ۲-۳- روش‌های گسسته‌سازی و حل معادلات در OpenFOAM

Gauss linear	گرادیان
Gauss upwind	عبارت جابه جایی
Gauss linear corrected	عبارت دیفیوژن
Linear solver GAMG	حلگر خطی
Gauss Seidel	حلگر تکراری

۳-۶ مطالعات عددی ردیاب

همانطور که در فصل دوم ذکر شده است هیدرولیک و هیدرودینامیک از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر طراحی و راهبری سیستم حوضچه‌های تثبیت فاضلاب است در این راستا جهت بدست آوردن ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان عبوری از حوضچه‌ها، از منحنی زمان ماند هیدرولیکی^۱ RTD استفاده می‌گردد و فاکتورهای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی ارائه شده در فصل دوم، محاسبه می‌شوند.

^۱ Hydraulic residence Time

در این مطالعه، جهت شبیه‌سازی عملیات ردیاب^۱ در حوضچه‌های واقعی و همچنین استخراج منحنی زمان ماند هیدرولیکی مربوط به هر حوضچه از حل گر scalarTransportFoam استفاده شده است. معادله پخش غلظت که در رابطه ۳-۱ آمده است در دامنه‌ی محاسباتی مربوط به حوضچه مذکور حل شده است.

$$\frac{\partial \rho Q_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i Q_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_k \frac{\partial Q_k}{\partial x_i} \right) \quad (۳-۱)$$

در رابطه ۳-۱؛ Q کمیت مورد انتقال $\frac{kg}{m^3}$ ، D ضریب پخش و ρ چگالی است.

در این حل گر مشابه حل گر simpleFoam که برای حل جریان از آن استفاده شد، سه پوشه 0، constant و system حضور دارند. برای انجام تنظیمات قبل از حل مسأله اقدامات زیر صورت گرفته است:

در پوشه 0 دو فایل برای تعیین شرایط اولیه و مرزی متغیرهای سرعت و غلظت وجود دارد. در ابتدا جریان توسط حل گر simpleFoam در حوضچه مورد بحث ابتدای فصل، حل شده است و پوشه‌های زمانی مربوط به هر گام زمانی حل موجود می‌باشند. فایل سرعت در پوشه‌ی زمانی مربوط به زمان ماند تئوریک حوضچه به عنوان شرط مرزی سرعت در حل گر scalarTransportFoam مورد استفاده قرار گرفت.

برای اعمال شرط مرزی مربوط به تزریق ردیاب همانطور که در تحقیقات گذشته نیز اشاره شده است (Lizima. 2013 and Ouedraogo et al. 2016) مطالعات عددی ردیاب با آزاد سازی ردیاب مورد نظر در ورودی حوضچه به صورت لحظه‌ای و با غلظت $1 \frac{gr}{l}$ در طول $17 min$ انجام شده است. زمان ماند تئوریک حوضچه $(\frac{V}{Q})$ به عنوان زمان پایان پردازش تنظیم شد و فواصل نمونه برداری غلظت از خروجی حوضچه هر $180 min$ انتخاب شد.

¹ Tracer

بنابراین با شبیه‌سازی تزریق ردیاب در ورودی، بعد از اتمام حل مسأله با استخراج غلظت ردیاب در زمان‌های مختلف از مقطع خروجی حوضچه و با رسم غلظت ماده‌ی ردیاب به ازای زمان، منحنی زمان ماند هیدرولیکی به دست آمده است. ترسیم منحنی زمان ماند هیدرولیکی علاوه بر تعیین روند پخشیدگی جریان در طول حوضچه، امکان تفسیر پارامترهای هیدرولیکی شامل حجم موثر و راندمان هیدرولیکی را فراهم نموده است. به طور کلی براساس توضیحات ارائه شده در فصل دوم از منحنی زمان ماند هیدرولیکی اطلاعات زیادی جهت ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه می‌توان استخراج کرد که در فصل چهارم به طور کلی ارائه می‌گردد.

در این پژوهش بر اساس نوع رژیم جریان، نوع حل‌گر مناسب برای حل جریان، در نرم‌افزار تعیین گردید به همین منظور در ادامه به بیان روابط حاضر در تعیین رژیم جریان، پرداخته می‌شود و سپس به بررسی مسائل خاص در آشفتگی پرداخته خواهد شد.

۳-۷ رژیم جریان

طبق تعریف رژیم جریان در مکانیک سیالات، به دو دسته اصلی، رژیم جریان آرام و آشفته تقسیم‌بندی می‌شود. در رژیم جریان آرام، سیال به صورت منظم و تحت لایه‌ها و مسیرهای مشخص و منظم حرکت می‌کند. از همین رو برای توصیف این نوع جریان از عبارت Laminar به معنای طبقه شده استفاده می‌شود؛ اما معمولاً در اغلب جریان‌های مهندسی، وضع به همین منوال باقی نمی‌ماند، با حرکت سیال به سمت پایین‌دست جریان و همزمان با بلوغ جریان و انباشته شدن اغتشاشات جریانی، بر روی یکدیگر و پس از طی شدن مراحل میانی که اصطلاحاً مرحله‌ی گذر جریان نامیده می‌شود، یک جریان آشفته رخ می‌دهد.

از آنجایی که بسیاری از جریان‌های طبیعی رژیم آشفته دارند، در ادامه معیارهای تشخیص جریان آرام از آشفته بررسی می‌شود.

۳-۸ معیار سنجش رژیم جریان آرام و آشفته

برای تشخیص آرام یا آشفته بودن جریان‌های مهندسی از اعداد بدون بعد می‌توان استفاده کرد. معمولاً عدد رینولدز مهم‌ترین معیار تشخیص یک جریان آرام از یک جریان آشفته می‌باشد. در کتاب‌های مکانیک سیالات کلاسیک اشاره شده است که هر جریانی بسته به نوع سیال به کار رفته در آن، اندازه‌ی سرعت جریان عبوری و همچنین طول مقیاس هندسی مسأله، در یک عدد رینولدز (که آن را اصطلاحاً رینولدز بحرانی می‌نامند) به حالت آشفته می‌رسد (Wilcox 1998).

با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش و بر اساس خصوصیات جریان، رژیم جریان استفاده شده در این پژوهش از نوع آشفته بوده و بر این اساس کلیات جریان آشفته که در مدل‌سازی با نرم‌افزار OpenFOAM مورد نیاز است، در ادامه بررسی می‌شود.

۳-۹ مروری بر روش‌های RANS

معادله‌های RANS، معادله‌های متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال است. ایده‌ی تشکیل دهنده‌ی این معادله‌ها، تجزیه‌ی رینولدز است که به وسیله‌ی آن یک مقدار لحظه‌ای، به مقادیر متوسط زمانی و نوسانی خود تجزیه شده است. از معادله‌های RANS برای توصیف جریان‌های آشفته استفاده می‌شود. این معادله‌های ارائه شده در رابطه (۳-۲) بر اساس خواص جریان آشفته، تقریبی از حل‌های متوسط زمانی معادله‌های ناویه استوکس را ارائه می‌دهند.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (3-2)$$

که در آن ρ چگالی، μ لزجت، $\overline{u_i u_j}$ تنش‌های رینولدز، $\bar{u}_i$ سرعت متوسط است.

عبارت تنش رینولدز غیرخطی، نیاز به مدل سازی اضافی به منظور نزدیکی به معادله ی RANS برای حل شدن دارد. از میان مدل های ارائه شده در روش مدل سازی آشفتگی RANS، مدل های دو معادله ای برای مدل سازی جریان های آشفته مورد استفاده قرار گرفته اند. (Wilcox 1998).

بر این اساس در این پژوهش جهت مدل کردن آشفتگی از مدل $K - \varepsilon$ استاندارد و همچنین برای کاهش هزینه های محاسباتی از تابع دیوار استاندارد برای مدل سازی پروفیل های مرتبط با لایه ی مرزی مجاور دیوار، استفاده شده است.

۳-۹-۱ مدل استاندارد $K - \varepsilon$

رایج ترین مدل دو معادله ای تا آخرین دهه قرن بیستم مدل $K - \varepsilon$ بود. به عبارتی شامل دو معادله انتقالی اضافی (رابطه ۳-۴ و ۳-۵) برای محاسبه خواص آشفتگی جریان می باشد. اولین متغیر انتقالی، انرژی جنبشی آشفتگی یا k است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا ε است. هدف از تدوین این مدل استخراج معادله ای دقیق برای ε و یافتن تقریب های بستاری مناسبی برای معادله حاکم بر عملکرد آن است. همچنین لزجت سینماتیکی آشفتگی از رابطه (۳-۳) قابل محاسبه است.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \frac{\rho \overline{u_i' u_j'} \partial u_j}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (4-3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - c_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} (\rho \overline{u_i' u_j'}) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5-3)$$

در روابط مذکور v_t لزجت سینماتیکی آشفتگی، k انرژی جنبشی، ε نرخ اضمحلال آشفتگی، ρ چگالی، u سرعت جریان، μ لزجت دینامیکی جریان آرام، μ_T لزجت دینامیکی آشفتگی، $(C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon)$ چگالی، $c_{2\varepsilon}, c_{1\varepsilon}$ از ثابت های معادله ی مدل (جدول ۳-۱) است.

۳-۹-۲ تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد $K - \varepsilon$

با مقایسه پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل استاندارد $K - \varepsilon$ و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی، مقادیر تقریبی ثابت موجود در مدل استاندارد $K - \varepsilon$ به صورت جدول ۳-۲ محاسبه خواهند شد.

جدول ۳-۳- ضرایب مورد استفاده در معادله‌های مدل استاندارد $K - \varepsilon$

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_ε	σ_k
۰,۰۹	۱,۴۴	۱,۹۲	۱,۳۰	۱,۰۰

این مقادیر برای طیف وسیعی از جریان‌های مهندسی قابل استفاده هستند (Wilcox 1998).

پس از تعریف این ضرایب در مدل، روابط ارائه شده برای محاسبه‌ی انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال انرژی در مقطع ورودی، به عنوان شرایط مرزی در حل مسأله به کار گرفته می‌شود. بر این اساس رابطه‌ی (۶-۱۳) نشان‌دهنده‌ی انرژی جنبشی آشفتگی است:

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2 \quad (۶-۳)$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتگی، U سرعت متوسط و T_i شدت آشفتگی می‌باشد. به طور کلی شدت آشفتگی برابر است با نسبت برآیند نوسانات سرعت به میانگین سرعت در یک جریان آشفته که بر اساس شرایط جریان به دسته‌های زیر تقسیم می‌شود.

- شدت آشفتگی زیاد: در این حالت جریان با سرعت زیاد در یک مسیر با شکل پیچیده مانند حرکت جریان در یک توربین، حرکت می‌کند. در این جریان‌ها، شدت آشفتگی بین ۵ تا ۲۰ درصد تغییر می‌کند.

- شدت آشفته‌گی متوسط: جریان‌هایی که در مسیرهای غیرپیچیده مانند لوله‌های بزرگ یا با سرعت کم در حرکت هستند، از این گروه جریان‌ها می‌باشند که دارای شدت آشفته‌گی بین ۱ تا ۵ درصد هستند.

- شدت آشفته‌گی کم: جریان‌هایی که از یک سیال ثابت به وجود می‌آید دارای شدت آشفته‌گی کم هستند. این جریان‌ها معمولاً در اطراف ماشین‌ها، زیردریایی‌ها و هواپیماها اتفاق می‌افتد و دارای شدت آشفته‌گی کمتر از ۱ درصد است.

علاوه بر این، در این مدل بر اساس ضرایب ارائه شده می‌توان رابطه‌ی (۷-۳) را برای نرخ اضمحلال انرژی بیان کرد.

$$\varepsilon = C_{\mu}^{0.75} \frac{k^{1.5}}{l} \quad (7-3)$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفته‌گی به دست آمده از رابطه‌ی (۳-۶)، l مقیاس طولی آشفته‌گی و C_{μ} یکی از ثابت‌های معادله‌ی مدل (جدول ۳-۱) است. جهت به دست آوردن طول آشفته‌گی در مدل‌سازی عددی توصیه‌های متفاوتی ارائه شده است. که یکی از پر کاربردترین آن‌ها استفاده از کوچک‌ترین بعد المان تولید شده در شبکه‌ی حل به عنوان طول آشفته‌گی می‌باشد (Wilcox 1998).

۳-۹-۳ تابع دیوار استاندارد

این توابع در واقع یک سری پروفایل‌های تحلیل- تجربی مرتبط با لایه‌ی مرزی مجاور دیواره هستند که با استفاده از روش‌های تحلیلی و پس از حل صریح معادله‌های ساده شده‌ی ناویه- استوکس در نزدیکی دیواره به دست آمده‌اند. به طور کلی مزیت استفاده از توابع دیواره را می‌توان به صورت زیر در چند عنوان کلی دسته‌بندی نمود:

- کاهش حجم محاسبات به واسطه‌ی عدم نیاز به شبکه بندی متراکم در نواحی نزدیک به دیواره
- افزایش دقت محاسبات

- ایجاد امکان انتگرال گیری برای مدل های آشفتگی که قابلیت انتگرال گیری تا لب مرز دیواره های

جامد را ندارد

بنابراین توابع دیواره مجموعه ای از پروفیل های نیمه تجربی می باشند که مقادیر متغیرهای فیزیکی مربوط به المان های عددی نزدیک دیواره را به مقادیر نظیر بر روی دیواره مرتبط می سازند.

فصل چهارم

نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

شناخت رفتار هیدرولیکی در تعیین خصوصیات حوضچه تثبیت فاضلاب بسیار مهم است، زیرا هیدرودینامیک حوضچه نقش اساسی در راندمان تصفیه فاضلاب دارد. به طوری که کاهش انبساط حجم لجن در کف حوضچه و همچنین کاهش اتصال کوتاه در حوضچه موجب افزایش عملکرد هیدرولیکی خواهد شد.

یکی از راهکارهای افزایش عملکرد هیدرولیکی استفاده از توزیع کننده‌های عمقی است که باعث اختلاط بیشتر جریان در حوضچه و جلوگیری از انباشت لجن در کف حوضچه می‌شود در نهایت منجر به افزایش راندمان هیدرولیکی حوضچه می‌گردد.

در این فصل ابتدا به مدل‌سازی دو بعدی حوضچه تثبیت فاضلاب در مقیاس کامل با ورودی و خروجی مستغرق پرداخته شد، سپس به مقایسه‌ی نتایج الگوهای جریان با نتایج میدانی و همچنین نتایج شبیه‌سازی این حوضچه در مطالعات گذشته اقدام شده است. داده‌های میدانی و شبیه‌سازی این مدل توسط لیزاما در سال ۲۰۱۳ گردآوری گردیده است (Lizima 2013). در ادامه جهت بررسی هیدرودینامیک جریان در حوضچه با استفاده از شبیه‌سازی ردیاب، منحنی RTD استخراج گردید و با منحنی RTD حاصل از مطالعات میدانی مقایسه شد علاوه بر دقت و صحت مدل CFD در این بخش تأیید گردید. در بخش بعدی جهت بررسی هیدرولیک جریان در حوضچه تحت تأثیر توزیع کننده‌های عمقی، بعد از مدل‌سازی هندسه‌های مربوطه، به تحلیل توزیع سرعت و تصاویر لحظه‌ای از انتقال ردیاب در حضور توزیع کننده‌های عمقی در حوضچه پرداخته می‌شود. بنابراین پس از شبیه‌سازی ردیاب، منحنی RTD استخراج شده است و در گام بعدی با استفاده از منحنی توزیع زمان ماند به ارزیابی پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه پرداخته می‌شود.

۲-۴ بررسی صحت مدل سازی در نرم افزار OpenFOAM

اعتبارسنجی مدل های CFD یک گام ضروری در تمامی کارهای عددی محسوب می شود به طوری که دقت مدل سازی سیستم های واقعی را بررسی می کند. به طور عمده این مرحله بررسی صحت مدل سازی برای تولید نتایج رضایت بخش است بعلاوه تأیید می کند که در گام بعدی می توان مدل سازی را توسعه داد و نتایج حاصل از آن با اطمینان بیشتری مورد استفاده قرار داد. مقایسه ی نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی یکی از قابل اعتمادترین روش های صحت سنجی مدل سازی محسوب می گردد.

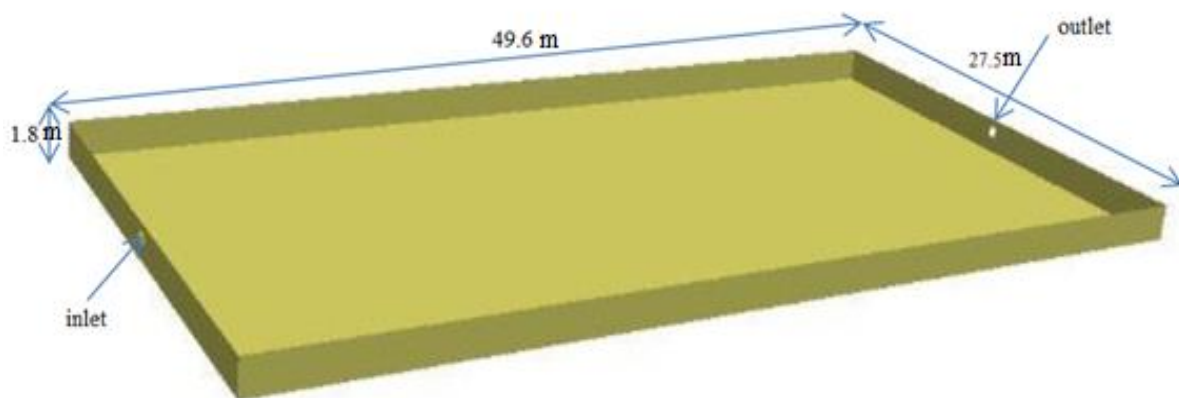
همان طور که در فصل دوم اشاره شد در پیرامون حوضچه های تثبیت فاضلاب تحقیقات عمده ای انجام شده است، به عنوان نمونه لیزیما به منظور ارزیابی هیدرولیک جریان درون حوضچه تثبیت فاضلاب علاوه بر آزمایشات میدانی ردیاب در حوضچه، جریان دو بعدی در داخل حوضچه را با کمک نرم افزار OpenFOAM تحلیل و به کمک نتایج میدانی به دست آمده در تحقیق خود، درستی و صحت نتایج را تأیید کرد. رژیم جریان حاکم بر مسأله آشفته بوده است و از مدل آشفتگی $K - \epsilon$ برای مدل سازی استفاده شده است.

بر این اساس جهت تحقیق صحت و درستی فرآیند مدل سازی در این پژوهش، ابتدا به مدل کردن مسأله ذکر شده در تحقیق بالا به کمک نرم افزار OpenFOAM پرداخته شده و سپس با مقایسه ی نتایج به دست آمده، درستی ضرایب و فرآیندهای مدل سازی جریان آشفته با مدل $K - \epsilon$ مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۴-۱ بیان مسأله

در این مسأله، فاضلاب برای انجام عملیات تصفیه در یک حوضچه تثبیت با ابعاد نشان داده شده در شکل ۴-۱ جریان دارد. میانگین نرخ جریان ورودی به حوضچه $60 \frac{m^3}{day}$ است. سیال مورد استفاده

طبق مقاله مرجع، آب ۲۰ درجه سیلسیوس با فرض تراکم ناپذیری و خصوصیات فیزیکی ثابت است. با توجه به اینکه غلظت مواد جامد معلق در حوضچه تثبیت فاضلاب کمتر از $100 \frac{mg}{l}$ می باشد بنابراین تأثیر خیلی ناچیزی بر روی خواص فیزیکی سیال می گذارد (Wood, Greenfield et al. 1995). بعلاوه در این مدل، جریان به صورت تک فازی مدل شد (Stamou, Adams et al. 1989) و از اثرات باد و دما در حوضچه صرف نظر شده است. لذا فقط میدان جریان داخل حوضچه مد نظر بوده است و سیال درون حوضچه آب زلال در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ جریان ورودی ثابت، در نتیجه شرایط جریان دائمی در حوضچه حاکم است. برای کاهش خطای عددی ناشی از مجزاسازی معادلات از روش بالادست مرتبه دو و از الگوریتم Simple برای حل همزمان فشار و سرعت استفاده گردیده است.



شکل ۴-۱- هندسه ۱، حوضچه مورد مطالعه در تحقیقات لیزیم (Lizima 2013)

از مدل آشفتگی $K - \varepsilon$ استفاده شده است. این مدل از تابع دیوار استفاده می کند به طوری که مقادیر متغیرهای فیزیکی مربوط به المان های عددی نزدیک دیواره را به مقادیر نظیر بر روی دیواره مرتبط می سازد و حجم محاسبات را کاهش می دهد. شدت آشفتگی در محل ورودی حوضچه ها بین صفر تا ۲۰٪ متغیر است، که در این مدل مقدار متوسط ۵٪ در نظر گرفته شده است (Versteeg and Malalasekera 1995, Wilcox 1998).

مشخصات سیال و جریان مطابق جدول ۴-۱ در مسأله مطرح گردیده است. در نهایت تحلیل جریان در این حوضچه بررسی می شود.

جدول ۴-۱- مشخصات سیال و شرایط مرزی حاکم بر مسأله جهت اعتبار سنجی با استفاده از OpenFOAM

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی	۹۹۸/۲	$\frac{kg}{m^3}$
ویسکوزیته دینامیکی	$1/0.03e^{-3}$	$\frac{kg}{m.s}$
سرعت ورودی در جهت x	۰/۰۰۲۲۷	$\frac{m}{s}$
سرعت خروجی در جهت x	۰/۰۰۲۲۷	$\frac{m}{s}$
سرعت ورودی در جهت y	۰/۰	$\frac{m}{s}$
سرعت خروجی در جهت y	۰/۰	$\frac{m}{s}$
سرعت در جداره حوضچه	۰/۰	$\frac{m}{s}$
فشار در ورودی	گرادیان صفر	$\frac{m^2}{s^2}$
فشار در خروجی	۰/۰	$\frac{m^2}{s^2}$
فشار در سطح آزاد	۰/۰	$\frac{m^2}{s^2}$

۴-۲-۲ ارائه نتایج و فرآیند مدل سازی در نرم افزار OpenFOAM

جهت مدل سازی مسأله مورد بحث در این نرم افزار ابتدا با مشخص کردن ابعاد و رعایت موارد مربوط به روند مدل سازی عددی که در فصل سوم به آن اشاره شد، شبکه‌ی مورد نظر جهت حل مسأله‌ی ذکر شده در بالا توسط دستور BlockMesh تولید شد. در گام بعدی جهت انتخاب حل گر مناسب با توجه به حل گرهای موجود در کتابخانه این نرم افزار از حل گر simpleFoam که توانایی حل معادلات RANS با مدل آشفتگی $K - \varepsilon$ استاندارد را دارد استفاده شد. این حل گر برای مدل سازی سیالات تراکم ناپذیر مناسب است. بنابراین ضریب لزجت سینماتیکی آب بر حسب $\frac{m^2}{s}$ به عنوان یکی از ضرایب ثابت جهت حل در این مسأله استفاده می شود. مقادیر k و ε در قسمت ورودی به عنوان شرط مرزی بر اساس فرمول های ارائه شده در فصل سوم بخش تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد

$k - \varepsilon$ محاسبه شده است، به طوری که در این فرمول‌ها شدت آشفتگی بر اساس سرعت ورودی، δ در صد در نظر گرفته شد. از ضرایب مدل $k - \varepsilon$ استاندارد جهت استفاده در فرمول K و ε استفاده شده است. همچنین مقیاس طول آشفتگی برابر است با 0.139 متر در نظر گرفته شده است.

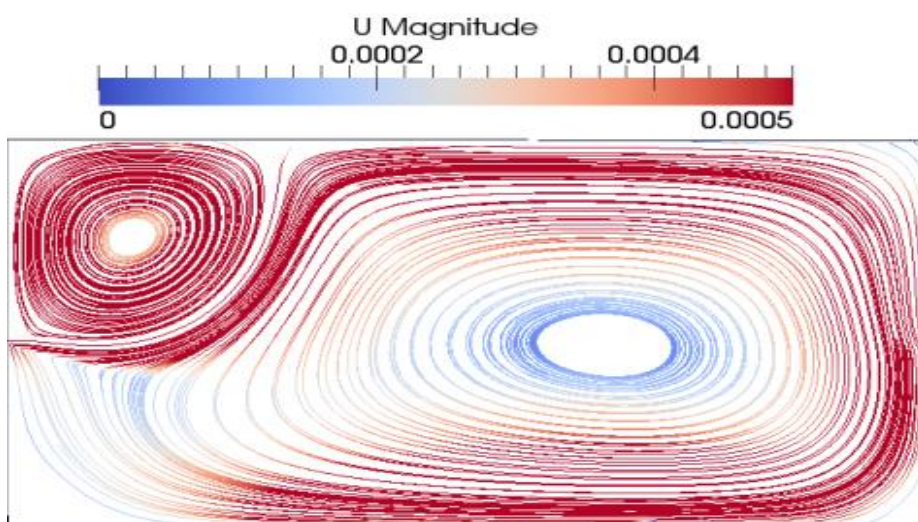
پس از مدل سازی مسأله مذکور در نرم افزار OpenFOAM بر اساس نتایج ارائه شده در تحقیق لیزیمما شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴، نتایج این پژوهش نیز جهت بررسی و مقایسه در شکل ۴-۴ ارائه شده است.

لیزیمما در ابتدای شروع پژوهش خود از حوضچه مورد نظر تصاویری تهیه نمود که در این تصاویر به وضوح مناطق مرده در حوضچه قابل مشاهده‌اند. همان طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است در دو گوشه‌ی حوضچه نزدیک ورودی جریان مناطق مرده شکل گرفته‌اند. در واقع مناطق مرده به صورت محلی، ناحیه‌ای از حوضچه را شامل می‌شوند که در آن نواحی سرعت حرکت سیال بسیار کم است. مواد آلی به علت تمایل جریان به ایجاد این مناطق، به آرامی در کف حوضچه انباشته می‌شود (Shilton and Harrison 2003). بعلاوه این نواحی منجر به ته‌نشینی و انباشت لجن در کف حوضچه در نتیجه کاهش حجم موثر حوضچه و کاهش راندمان هیدرولیکی می‌گردند.

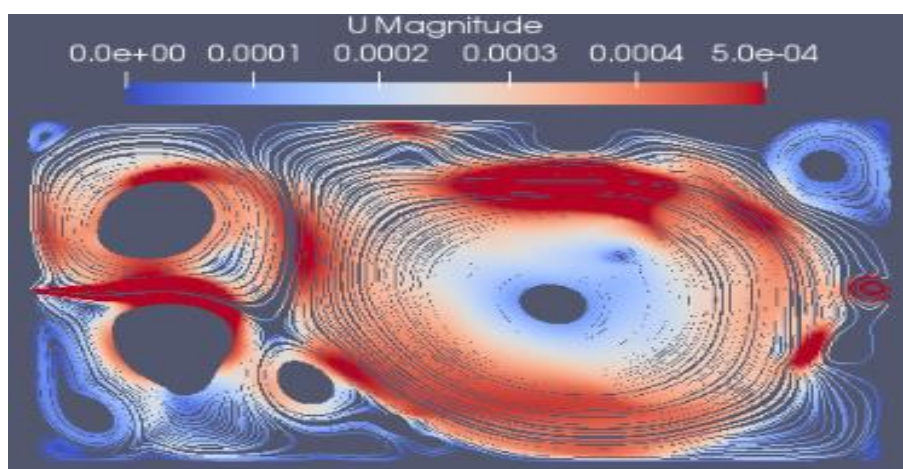
در شکل ۳-۴ که خطوط جریان مربوط به تحقیق عددی لیزیمما است، سه منطقه‌ی مرده و یا باز چرخشی طبق گزارش‌های میدانی لیزیمما مشاهده شد. این مناطق به ترتیب در گوشه سمت چپ مقطع ورودی حوضچه و همچنین در مرکز حوضچه مشاهده شده است. شکل ۴-۴ خطوط جریان به دست آمده در این پژوهش، جهت اعتبار سنجی با تحقیق لیزیمما را نشان می‌دهد به طوری که نسبت به آنچه که در واقعیت رخ می‌دهد از نظر کیفی نزدیک شده است.



شکل ۴-۲- مشاهدات میدانی لیزیما (Lizima 2013)

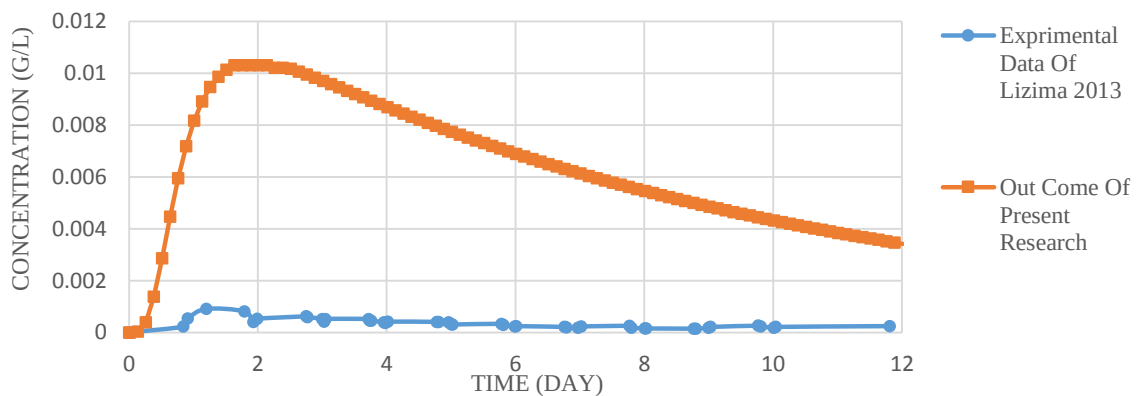


شکل ۴-۳- خطوط جریان به دست آمده از نتایج مدل سازی دو بعدی در تحقیق لیزیما (Lizima 2013)

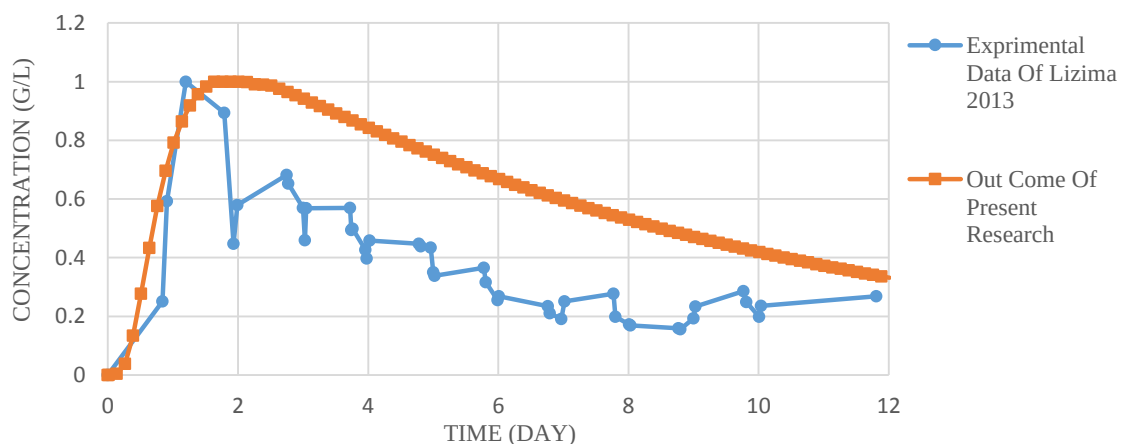


شکل ۴-۴- خطوط جریان به دست آمده در این پژوهش جهت اعتبارسنجی

در گام بعدی، شبیه‌سازی ماده‌ی ردیاب در داخل حوضچه انجام شد. منحنی زمان ماند به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی در این پژوهش و نتایج میدانی در تحقیقات لیزیما مطابق شکل ۴-۵ با هم مقایسه شدند. نقطه اوج مشاهده شده در منحنی RTD حاصل از نتایج CFD در این پژوهش کاملاً منطبق بر نقطه اوج در منحنی RTD حاصل از نتایج میدانی لیزیما نیست. در واقع مقایسه‌ی منحنی‌های زمان ماند گویای این است که حداکثر مقدار غلظت ماده ردیاب خارج شده از حوضچه در نقطه اوج با هم متفاوت است اما زمان وقوع نقطه اوج تقریباً قبل از شروع روز دوم رخ می‌دهد شکل ۴-۶ (منحنی نرمال شده RTD) گویای این موضوع است.



شکل ۴-۵- مقایسه‌ی منحنی زمان ماند حاصل از مطالعات میدانی ردیاب (Lizima 2013) و منحنی زمان ماند حاصل از این پژوهش



شکل ۴-۶- منحنی نرمال شده RTD، مقایسه‌ی زمان وقوع اولین نقطه اوج ردیاب در مطالعات میدانی گذشته (Lizima 2013) و این پژوهش

در این پژوهش مقایسه‌ی مستقیم مطالعات عددی ردیاب با مطالعات میدانی ردیاب به علت نمونه برداری کم در مطالعات میدانی امکان پذیر نیست. بنابراین به منظور جلوگیری از نمونه برداری‌های کم در مطالعات میدانی برای بررسی هیدرولیک حوضچه، پیشنهاد می‌شود فواصل زمانی نمونه برداری در مطالعات میدانی ردیاب کمتر شود.

بعلاوه به علت بزرگ بودن فواصل زمانی در زمان شروع مطالعات ردیاب لیزیم و همچنین تغییرات سریع غلظت ممکن است در نقطه اوج مقدار دقیق غلظت ردیاب موجود نباشد. با این حال داده‌های ردیاب جمع آوری شده در خروجی حوضچه نشان می‌دهد که نقطه‌ی اوج قبل از روز دوم اتفاق می‌افتد. بعلاوه در منحنی RTD به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه زمان وقوع نقطه اوج قبل از روز دوم است اما مقدار غلظت در نقطه‌ی اوج مشابه با نتایج میدانی نیست زیرا در پژوهش قبلی فقط ۳۰٪ از ردیاب تزریق شده جمع آوری شده است بنابراین حدود ۷۰٪ از ردیاب در حوضچه جمع آوری نشده و با جریان حوضچه مخلوط گردیده است. در نتیجه اگرچه منحنی RTD حاصل از CFD با نتایج میدانی لیزیم انطباق کامل ندارد، اما نتایج اعتبار سنجی مدل CFD به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد نزدیک شده است.

جدول ۴-۲ جهت بررسی و مقایسه‌ی نتایج گزارش شده در تحقیق لیزیم و نتایج این مطالعه ارائه شده است. در این جدول در ستون اول نتایج میدانی و در ستون دوم نتایج مربوط به مدل‌سازی مربوط به تحقیق لیزیم، در ستون سوم نتایج مربوط به مدل‌سازی در پژوهش حاضر به کمک نرم‌افزار OpenFOAM، در ستون چهارم درصد خطا بین نتایج میدانی و نتایج عددی در تحقیق لیزیم و در ستون آخر درصد خطا بین نتایج میدانی و نتایج عددی در این پژوهش ارائه می‌شود.

جدول ۴-۲- مقایسه‌ی نتایج میدانی و نتایج مدل‌سازی با OpenFOAM

پارامترها	نتایج میدانی	نتایج CFD در تحقیق لیزیمما	نتایج OpenFOAM	درصد خطا بین ستون	درصد خطا بین ستون
	(۱)	(۲)	(۳)	۱ و ۲	۱ و ۳
زمان وقوع اولین نقطه اوج در منحنی RTD	۱/۲	۰/۷۳	۱/۶۳	٪۳۹/۱۶	٪۳۵/۸
شاخص اتصال کوتاه	۰/۰۵	۰/۰۸۹	۰/۰۵۸	٪۷۸	٪۱۶
زمان ماند متوسط	۷/۸۳	۱۰/۸۸	۸/۸۳	٪۳۸/۹۵	٪۱۲

همان‌طور که در جدول ۴-۲ نشان داده شده است، درصد عدم تطابق محاسبه شده بین مدل‌سازی در این پژوهش و نتایج میدانی تحقیق لیزیمما کمتر از درصد عدم تطابق محاسبه شده بین مدل‌سازی انجام شده توسط لیزیمما و نتایج میدانی در همان تحقیق است به طوری که درصد عدم تطابق برای عبارت اتصال کوتاه کمتر از ۱۷ درصد و زمان ماند متوسط کمتر از ۱۳ درصد و زمان وقوع نقطه اوج کمتر از ۴۰ درصد محاسبه شده است، مدل‌سازی عددی مبتنی بر CFD به کمک OpenFOAM در این تحقیق توانسته است تا حد زیادی به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد و حاصل از نتایج میدانی نزدیک شود.

فرضیات ساده‌سازی مدل می‌تواند جز عوامل موثر بر نتایج باشد. از جمله این فرضیات به مدل‌سازی دو بعدی حوضچه و در نظر نگرفتن حجم لجن انباشته شده در حوضچه واقعی می‌توان اشاره کرد. بنابراین تنظیمات مدل‌سازی شامل: انتخاب بهترین شبکه‌ی حل، بهینه‌سازی گام زمانی، مدل‌سازی لجن انباشت شده در کف حوضچه، استفاده از یک مدل آشفتگی دقیق و تنظیم مقادیر مرزی در

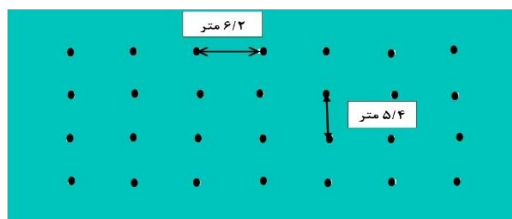
جریان آشفته، می‌تواند باعث بهتر شدن انطباق نتایج شود. بعلاوه باید محدودیت‌ها و دقت پایین گردآوری داده‌های میدانی را نیز در نظر گرفت.

۳-۴ مدل سازی مسأله در نرم افزار OpenFoam

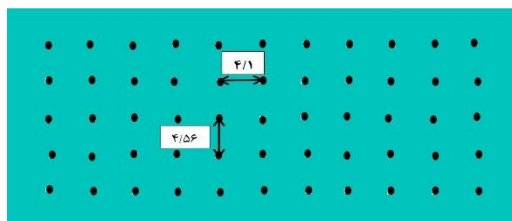
با توجه به هندسه و مشخصات حوضچه مربوط به تحقیقات لیزیم، در این پژوهش جهت بررسی عملکرد هیدرولیکی حوضچه به مدل سازی تزریق میکرو نانو حباب توسط توزیع کننده‌های عمقی در کف حوضچه پرداخته شده است. همچنین اثر تزریقات انجام شده از کف حوضچه در موقعیت‌های مختلف، با سطح مقطع و دبی جریان ثابت مورد بررسی قرار گرفت.

هندسه حوضچه‌های مورد نظر در شکل ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ نشان داده شده است. جهت بررسی اثر توزیع کننده‌های عمقی بر هیدرودینامیک حوضچه مذکور مطابق با توضیحات فصل سوم از سه طرح مختلف توزیع کننده در کف حوضچه استفاده شده است.

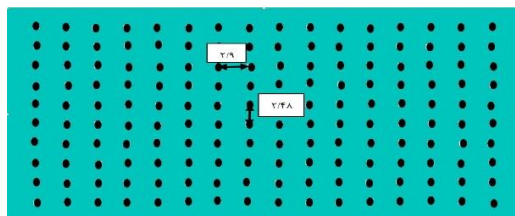
در هندسه دوم (شکل ۴-۷) توزیع کننده‌های عمقی به صورت روزنه‌هایی به قطر یک اینچ و با فواصل ۶/۲ متر در طول و ۵/۴ متر در عرض حوضچه تعبیه شده‌اند. در هندسه سوم (شکل ۴-۸) آرایش روزنه‌ها به گونه‌ای است که هریک از روزنه‌ها در فاصله‌ی ۴/۱ متر در طول و ۴/۵۶ متر در عرض قرار گرفته‌اند و در هندسه چهارم (۴-۹) روزنه‌ها در فاصله‌ی ۲/۹ متر در طول و ۲/۴۸ متر در عرض حوضچه واقع شده‌اند. در هر سه طرح ۱۰٪ نرخ جریان ورودی به حوضچه، به مجموعه روزنه‌های کف حوضچه اختصاص یافته است. با توجه به نزدیک بودن خواص فیزیکی میکرونانو حباب‌ها (بر اساس اندازه‌گیری‌های رادیوگرافی) به آب در این مرحله برای شبیه سازی تزریق میکرونانو حباب‌ها از آب استفاده شده است. در جداره‌ها و کف حوضچه از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شد و این هندسه‌ها به صورت سه بعدی مدل سازی شده‌اند. با توجه به اینکه دقت حل مسأله به تعداد شبکه سلول‌ها بستگی دارد در گام بعدی برای شبکه بندی محدوده‌ی محاسباتی شبکه یکنواخت انتخاب شد به طوری که فاصله‌ی اولین گره محاسباتی تا جداره حوضچه ۰,۰۴۵ در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۷- هندسه دوم مجهز به توزیع کننده، حاوی ۲۸ توزیع کنند



شکل ۴-۸- هندسه سوم مجهز به توزیع کننده، حاوی ۵۵ توزیع کننده



شکل ۴-۹- هندسه چهارم مجهز به توزیع کننده، حاوی ۱۶۰ توزیع کننده

۴-۴ نتایج و بحث

۴-۴-۱ بررسی تأثیرات توزیع کننده در حوضچه

در این بخش برای گزارش نتایج از Paraviwe استفاده شده است. بعلاوه نتایج شبیه‌سازی برای درک بهتر نحوه‌ی توزیع جریان و شبیه‌سازی انتقال ردیاب در حوضچه برای نمونه‌های دوم، سوم و چهارم از طریق شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۲ نشان داده شده است.

• تأثیر حضور توزیع کننده‌های عمقی بر نحوه‌ی توزیع جریان

شکل ۴-۱۰ توزیع جریان در صفحه‌ی افقی (X-Y) را نشان می‌دهد به طوری که شکل ۴-۱۰(الف) - پ- ث) مربوط به توزیع جریان در عمق ۵ سانتی‌متری از کف حوضچه و شکل ۴-۱۰(ب- ت- ج) مربوط به مرکز مقطع ورودی و خروجی جریان (۱/۱ متر از کف) برای هندسه دوم تا چهارم است.

در هندسه دوم همان طور که در شکل ۴-۱۰ (الف) مشاهده می شود در کف حوضچه ۲۸ روزنه قابل مشاهده است. جت وروی به حوضچه با سرعت بالا تا یک چهارم طول حوضچه پیشروی می کند. جریان توزیع کننده ها در محل ورود به حوضچه (در عمق آن) به خصوص قسمت بالا و سمت راست باعث توزیع مومنتوم در جریان درون حوضچه شده است اما در قسمت پایین حوضچه به جز در محل روزنه ها، سرعت صفر حاکم است این مناطق حجم مرده حوضچه را تشکیل می دهند.

در هندسه سوم شکل ۴-۱۰ (پ) نیز ۵۵ روزنه در کف حوضچه واقع شده است. در این هندسه منطقه ای که سرعت در نزدیکی جداره صفر است، نسبت به هندسه دوم و سعت کمتری پیدا کرده است بنابراین حجم مناطق مرده در این حوضچه نسبت به هندسه دوم کمتر شده است.

در هندسه چهارم شکل ۴-۱۰ (ث) منطقه رکود با سرعت صفر تقریباً وجود ندارد و جریان در نیمه ی اول حوضچه به طور یکنواخت سرعت بالایی دارد. در این هندسه ۱۶۰ روزنه تعبیه شده است.

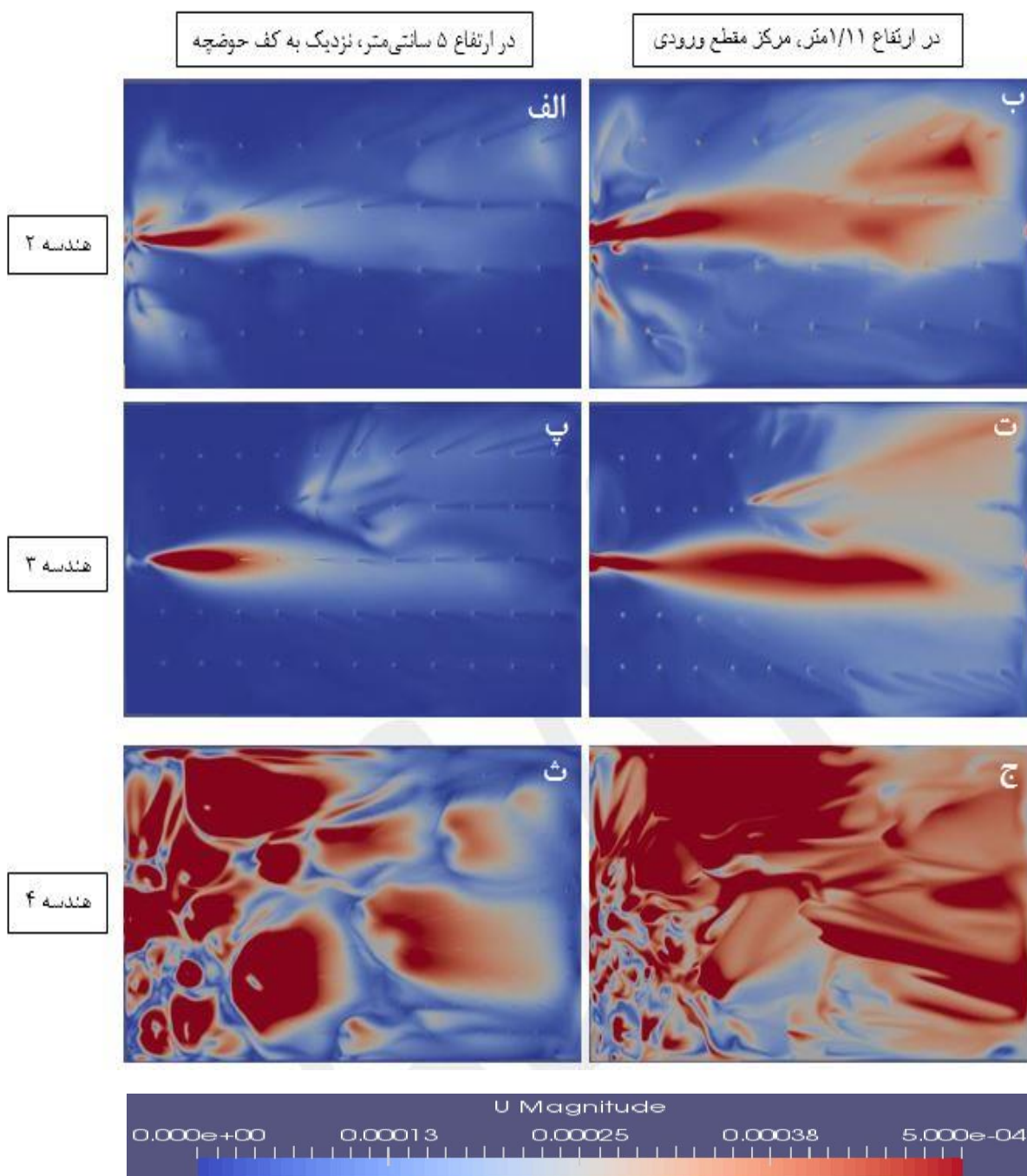
در شکل ۴-۱۰ (ب-ت-ج) توزیع سرعت در مرکز مقطع ورودی یعنی در ارتفاع ۱/۱۱ متری از کف حوضچه قابل مشاهده است. در وسط مقطع ورودی جریان به توجه به سرعت بالا جریان در مقطع ورودی در تمامی سه هندسه یک جت با سرعت بالا همان طور که انتظار می رود تشکیل شده است. این جت باعث ایجاد یک مسیر با سرعت بالا از مقطع ورودی به خروجی می شود بعلاوه جریان در این مسیر به علت سرعت بالا قادر به حمل ذراتی مثل مواد جامد معلق و ردیاب رنگی سریع تر از قسمت های دیگر است به این پدیده اتصال کوتاه یا مسیر میان بر گفته می شود وقوع این پدیده یکی از عوامل موثر در عملکرد هیدرولیکی پایین است. با توجه به شکل ۴-۱۰ (ب) مربوط به هندسه دوم در قسمت بالا و پایین مقطع ورودی جریان منطقه ی گردشی ایجاد شده است و یک جت با سرعت بالا از ورودی به سمت خروجی پیش می رود که باعث ایجاد مسیر میان بر در حوضچه می گردد. در شکل ۴-۱۰ (ت) نیز جت و اتصال کوتاه در مسیر ورودی به خروجی مشاهده شده است اما مناطق گردشی در حوضچه تشکیل نشده است.

با مقایسه هندسه دوم و سوم در شکل ۱۰-۴ (الف-ب و پ-ت) مشاهده می‌شود در شکل ۱۰-۴ (ب) فاصله‌ی زیاد بین توزیع کننده‌ها و همچنین عدم حضور توزیع کننده در راستای مقطع ورودی جریان قابل مشاهده در شکل ۱۰-۴ (الف)) باعث می‌شود مسیر جت تشکیل شده کشیده‌تر گردد بعلاوه مساحت سطح جت نسبت به ۱۰-۴ (ت) افزایش می‌یابد. در حالی که در شکل ۱۰-۴ (پ) توزیع کننده‌ها فاصله کمی از یکدیگر دارند و همچنین در راستای مقطع ورودی جریان درون حوضچه یک ردیف توزیع کننده تعبیه شده است در این حالت توزیع کننده‌ها از پیش روی جت جلوگیری می‌کنند بنابراین کشیدگی و مساحت سطح جت نسبت به هندسه دوم کمتر می‌گردد. بنابراین اتصال کوتاه در هندسه دوم نسبت به هندسه سوم بیشتر است.

در شکل ۱۰-۴ (ج) مناطق رکود یا مناطق مرده تشکیل نشده است. بنابراین در این حوضچه امکان توزیع یکنواخت‌تر جریان وجود دارد. به طور کلی همانطور که در شکل ۱۰-۴ مشاهده می‌شود تزریق از روزه‌ها واقع در کف، حوضچه تأثیر زیادی بر الگوی هیدرودینامیکی حوضچه داشته است.

بر اساس نتایج و الگوهای جریان به دست آمده می‌توان گفت که استفاده از روزه‌های تعبیه شده در کف با توجه به توزیع مومنوم، باعث اختلاط بیشتر در جریان شده و از به وجود آمدن مناطق رکود و مرده در تمامی حوضچه جلوگیری به عمل می‌آورند.

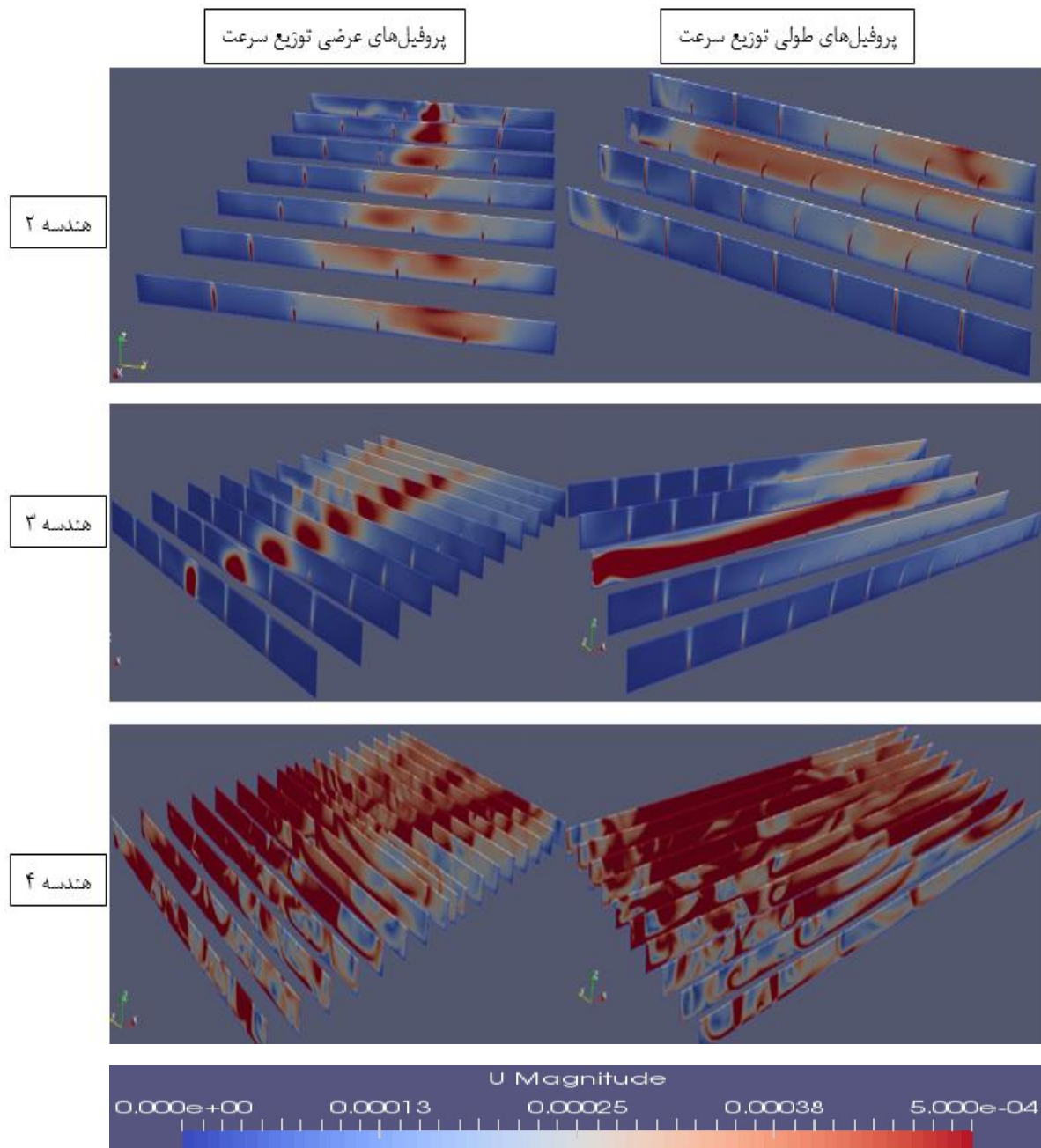
الگوی جریان بر انباشت و توزیع لجن در حوضچه اثر قابل توجهی دارد. بنابراین می‌توان گفت با توجه به اختلاط بیشتر و تغییر مومنوم در جریان، حجم لجن کمتری در حوضچه انباشته می‌شود همچنین با افزایش حجم موثر حوضچه، راندمان هیدرولیکی حوضچه افزایش می‌یابد. بعلاوه می‌توان نتیجه گرفت توزیع کننده‌ها عمقی و آرایش آن‌ها در کف حوضچه نقش مهمی در تعیین راندمان هیدرولیکی حوضچه دارد.



شکل ۴-۱۰ توزیع سرعت جریان در صفحه‌ی افقی (x-y) در حوضچه‌های مربوط به هندسه‌های ۲، ۳ و ۴، (الف-پ-ث) در عمق ۵cm از کف حوضچه جهت بررسی روزنه‌های واقع در کف، (ب-ت-ج) در مرکز مقطع ورودی جریان در ارتفاع ۱۱/۱۱m از کف

شکل ۴-۱۱ پروفیل‌های طولی و عرضی توزیع سرعت در حوضچه را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی جریان تزریق شده از توزیع کننده‌ها عمقی، آب در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود جریان تزریق شده از توزیع کننده‌ها مشابه جت عمل می‌کند.

سرعت جت‌های تشکیل شده در هندسه دوم با توجه به ثابت بودن نرخ جریان تزریق شده از مجموعه توزیع کننده‌ها در هر سه هندسه و کم بودن تعداد توزیع کننده‌ها در هندسه دوم بیش‌تر است. در هندسه چهارم با توجه به کم شدن فواصل بین توزیع کننده‌ها پخش یکنواخت جریان صورت گرفته است. در هر سه هندسه جت‌های تزریقی از کف در راستای ورودی جریان حوضچه منحرف شده‌اند.



شکل ۴-۱۱ پروفیل‌های طولی و عرضی توزیع سرعت در حوضچه‌های مربوط به هندسه‌های ۲، ۳ و ۴

میکرو نانو حباب‌ها با تزریق در محیط‌های آبی جریان را دو فازی نمی‌کنند و با توجه به اندازه‌گیری‌های رادیوگرافی انجام شده بر روی خواص میکرونانونحباب‌ها، مقدار چگالی و لزجت آن‌ها نسبت به خواص فیزیکی آب تغییری زیادی نکرده است. بنابراین به لحاظ هیدرولیکی تزریق آب یا میکرو نانو حباب از توزیع کننده‌های عمقی در نتایج توزیع سرعت‌ها تفاوتی ایجاد نمی‌کند. در واقع چون خواص میکرو نانو حباب‌ها چسبیده به آب است با تزریق میکرو نانو حباب‌ها درون حوضچه ثابت فاضلاب با توجه به خواص ویژه میکرو نانو حباب‌ها در انتقال و پخش اکسیژن، هم زمان اکسیژن به حد اشباع نزدیک می‌شود بنابراین عملکرد محیط زیستی کاملاً متفاوت می‌شود.

• مطالعات عددی ردیاب

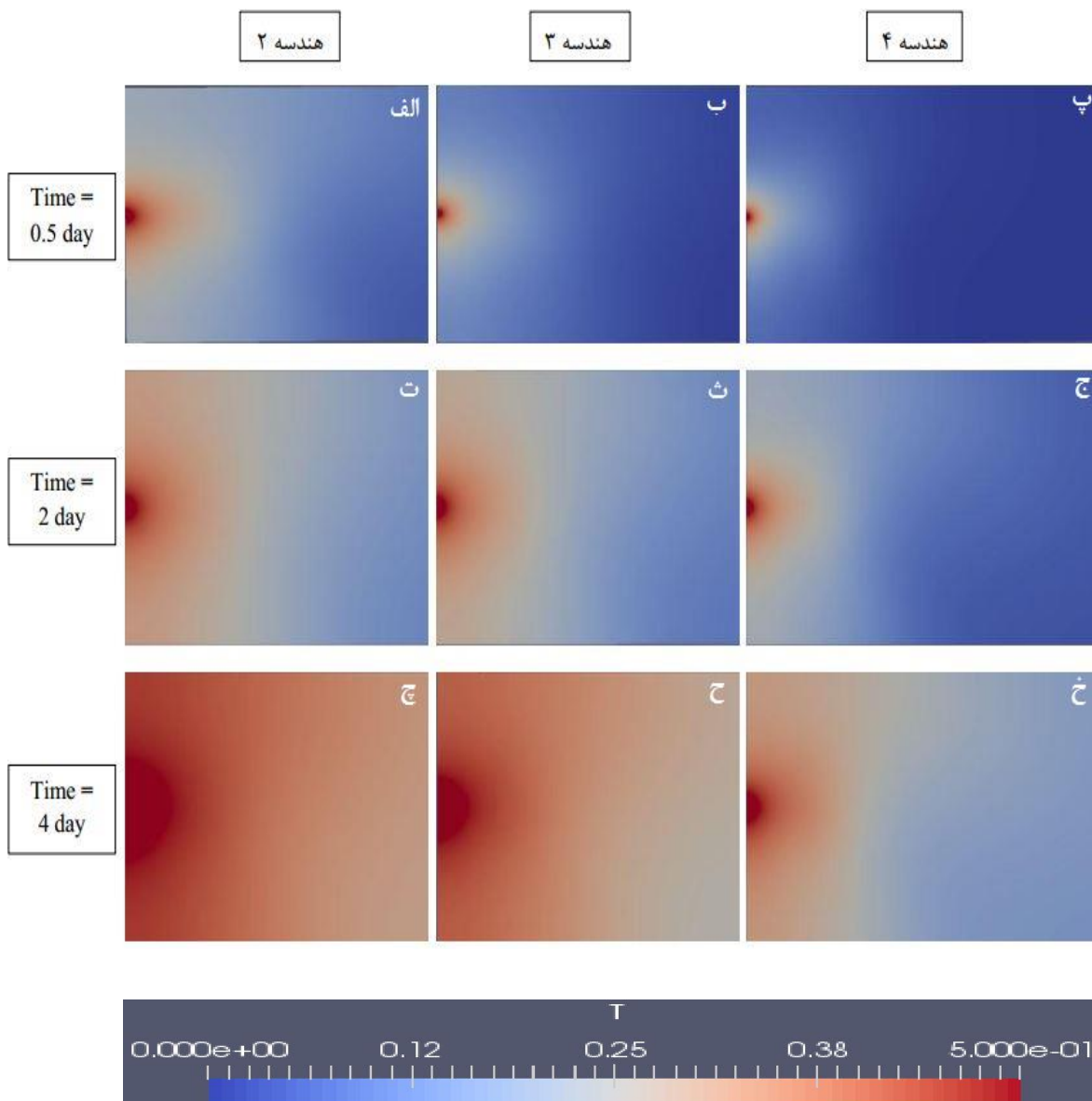
شکل ۴-۱۲ شبیه‌سازی انتقال ردیاب در هندسه‌ی دوم، سوم و چهارم را در سه زمان ۰/۵، ۲ و ۴ روز بعد از آزاد سازی ردیاب با غلظت اولیه‌ی $1 \frac{gr}{l}$ به مدت ۱۷ min در مقطع ورودی جریان واقع در عمق ۱/۱۱m را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی سه هندسه در شکل ۴-۱۲ (الف-ب-پ) مشاهده می‌شود بعد از گذشت ۰/۵ روز از تزریق ردیاب، بیشترین پیش‌روی ماده‌ی ردیاب در شکل ۴-۱۲ (الف) مربوط به هندسه دوم می‌باشد و کمترین پیش‌روی در همین مدت زمان مربوط به هندسه چهارم شکل ۴-۱۲ (پ) بوده است.

در شکل ۴-۱۲ (ت-ث-ج) مربوط به حوضچه‌های دوم، سوم و چهارم بعد از گذشت ۲ روز از آزاد سازی ردیاب مشاهده می‌شود که ردیاب در حوضچه چهارم کمترین پیش‌روی را نسبت به دو هندسه‌ی دیگر دارد.

با مقایسه شکل ۴-۱۲ (چ-ح-خ) مربوط به سه هندسه دوم، سوم و چهارم مشاهده شده است که با گذشت ۴ روز از آزاد سازی اولیه‌ی ردیاب در حوضچه، در هندسه دوم شکل (۴-۱۲ چ) ماده‌ی ردیاب زودتر از دو هندسه دیگر به مقطع خروجی حوضچه رسیده است در حالی که در حوضچه مربوط به هندسه چهارم شکل (۴-۱۲ خ) پخش ماده‌ی ردیاب تا اواسط حوضچه پیش رفته است و در هندسه

سوم شکل (۴-۱۲ ح) پیش‌روی ردیاب به مراتب کمتر از هندسه دوم شکل (۴-۱۲ چ) و بیشتر از هندسه چهارم (شکل ۴-۱۲ خ) بوده است. خروج سریع ردیاب در هندسه دوم شکل (۴-۱۲ چ) گویای بزرگ بودن شدت اتصال کوتاه در این حوضچه است در حالی که با مقایسه پیش‌روی ردیاب در هندسه‌های سوم و چهارم در شکل ۴-۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که زمان رسیدن به حداکثر غلظت ردیاب در مقطع خروجی حوضچه دیرتر از حوضچه مربوط به هندسه دوم بوده است. بنابراین نقطه اوج منحنی زمان ماند دیرتر اتفاق می‌افتد بعلاوه مسیر میان‌بر و اتصال کوتاه در حوضچه کمتر رخ می‌دهد. در واقع در این حالت مدت زمان بیشتری صرف رسیدن ردیاب به مقطع خروجی حوضچه می‌شود و ردیاب کاملاً در حوضچه پخش می‌گردد اما در هندسه دوم شکل (۴-۱۲ چ) ردیاب در مدت زمان کمتری از حوضچه خارج شده است بنابراین در این حوضچه اتصال کوتاه ایجاد شده است. این موضوع با تحلیل‌های قبلی در شکل ۴-۱۰ (ب) مطابقت دارد.

به طور کلی عمده مشکلات تصفیه خانه‌های فاضلاب خروج سریع آلودگی از حوضچه است. در واقع در این حالت فرصت کافی در اختیار میکروارگانیسم‌ها برای انجام عملیات تصفیه داده نمی‌شود به این پدیده اتصال کوتاه گفته می‌شود که در هندسه دوم مشاهده شد اما در هندسه چهارم با توجه به پخش جریان توسط توزیع کننده‌ها آلودگی در حوضچه بهتر پخش می‌شود و دیرتر به خروجی می‌رسد. بهینه‌ترین حالت زمانی حاصل می‌شود که آلودگی هیچ وقت به انتها نرسد و توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف گردد. بنابراین در هندسه چهارم با تأخیر دادن به خروج آلودگی به وسیله‌ی توزیع کننده‌ها فرصت کافی در اختیار میکروارگانیسم‌ها برای انجام عملیات تصفیه قرار داده شده است و اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها توسط میکرو نانو حباب‌ها تهیه می‌شود.



شکل ۴-۱۲- تصاویر لحظه‌ای از انتقال ردیاب در صفحه افقی (X-Y) و در مدت زمان‌های مختلف ۰،۲/۵ و ۴ روز بعد از آزاد سازی اولیه‌ی ردیاب در مقطع ورودی جریان

۴-۴-۲ منحنی توزیع زمان ماند

بعد از شبیه‌سازی انتقال ردیاب، در هر چهار هندسه‌ی مربوط به حوضچه تثبیت فاضلاب با تحلیل روند تغییرات غلظت ردیاب در مقطع خروجی حوضچه نسبت به زمان، منحنی توزیع زمان ماند RTD به دست آمد. این منحنی یکی از مشخصات منحصر به فرد جریان عبوری از حوضچه است. که جهت تعیین

اثرات هیدرولیکی توزیع جریان در حوضچه استفاده می‌شود و بر اساس آن می‌توان به ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه پرداخت.

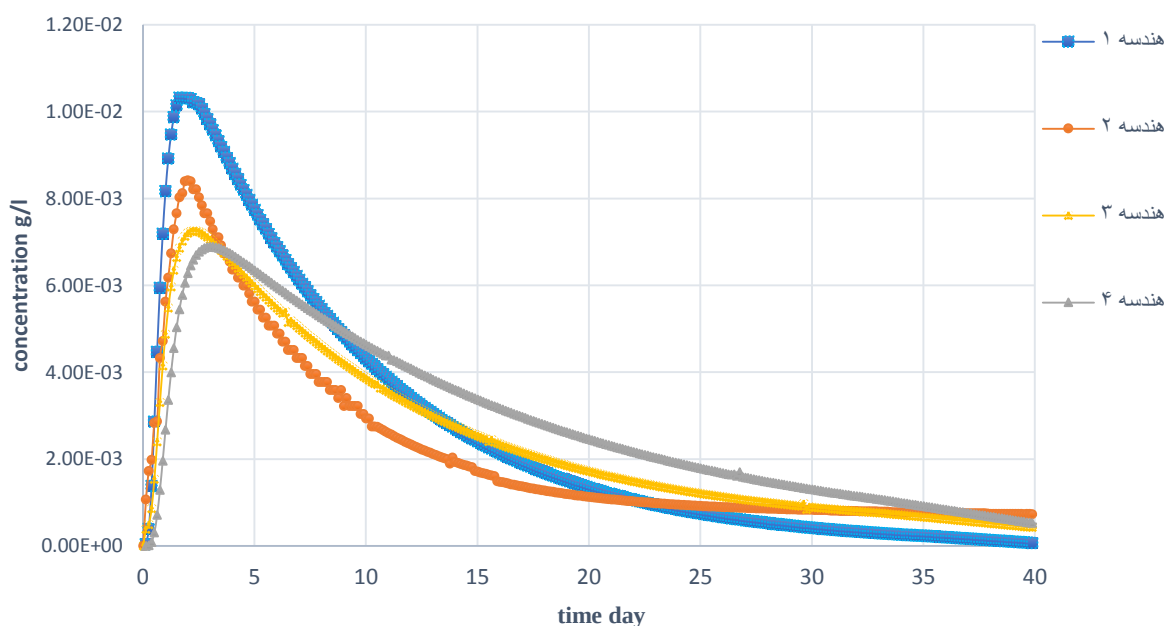
منحنی‌های توزیع زمان ماند هیدرولیکی RTD هر چهار هندسه، در شکل ۴-۱۳ استخراج و ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود منحنی آبی رنگ متعلق به هندسه اول بدون حضور توزیع کننده‌های عمقی در کف حوضچه، منحنی نارنجی رنگ نشان دهنده هندسه دوم با ۲۸ توزیع کننده تعبیه شده در کف، منحنی زرد رنگ متعلق به هندسه سوم با ۵۵ توزیع کننده و منحنی طوسی رنگ نشان دهنده هندسه چهارم با حضور ۱۶۰ توزیع کننده یک اینچی در کف حوضچه است.

در شکل ۴-۱۳ ابتدا مشاهده شد که نقطه اوج منحنی RTD در سه هندسه دوم، سوم و چهارم که در آن‌ها توزیع کننده‌های عمقی حضور دارند به طور قابل توجهی پایین‌تر از نقطه اوج در هندسه اول (فاقد توزیع کننده) است. پایین بودن نقطه اوج در سه هندسه دوم، سوم و چهارم حاکی از مخلوط شدن بهتر جریان در حوضچه، یکنواختی پخش جریان و کمتر شدن اتصال کوتاه و مسیرهای در حوضچه میان‌بر است. در هندسه اول نقطه اوج بالاتر و زودتر از هندسه‌های دیگر به وقوع می‌پیوندد. با توجه به تحقیقات انجام شده مسیر میان‌بر با وقوع زودتر و نقطه اوج بالاتر ردیاب، در حوضچه رخ می‌دهد (Shilton, Kreegher et al. 2008).

هندسه چهارم به علت کم بودن فاصله توزیع کننده از یکدیگر (۲/۹ متر) و در مجموع با ۱۶۰ توزیع کننده نقطه اوج پایین‌تری نسبت به هندسه دوم و سوم دارد. بعلاوه نقطه اوج در این هندسه دیرتر از تمامی هندسه‌های دیگر اتفاق می‌افتد به طوری که تقریباً ۳/۰۱ روز بعد از آزاد سازی اولیه ردیاب در

حوضچه، نقطه اوج رخ می‌دهد و به ترتیب در هندسه سوم نقطه اوج بعد از ۲/۲۶ روز، در هندسه دوم بعد از ۲/۰۱۱ روز و در هندسه اول بعد از ۱/۶۳ روز اتفاق می‌افتد.

با زیاد شدن زمان وقوع نقطه اوج، ردیاب فرصت کافی برای پخش یکنواخت در حوضچه را دارد و بلافاصله پس از تزریق، از حوضچه خارج نمی‌شود. بعلاوه با افزایش زمان خروج ردیاب از حوضچه اتصال کوتاه رخ نمی‌دهد بنابراین هندسه چهارم در مقایسه با هندسه اول اتصال کوتاه را کاهش می‌دهد.



شکل ۴-۱۳- مقایسه منحنی‌های توزیع زمان ماند مربوط به چهار هندسه مدل‌سازی شده در این پژوهش

۴-۳- ارزیابی پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب

ترسیم منحنی زمان ماند هیدرولیکی علاوه بر تعیین روند پخشیدگی جریان در طول حوضچه امکان تفسیر پارامترهای هیدرولیکی ارائه شده در فصل دوم شامل شاخص اتصال کوتاه، زمان ماند متوسط، زمان نقطه اوج، حجم موثر حوضچه و راندمان هیدرولیکی حوضچه را فراهم می‌نماید، به همین منظور در ادامه به بررسی پارامترهای موثر هیدرولیکی در حوضچه‌ها با و بدون حضور توزیع کننده‌ها پرداخته می‌شود.

نتایج حاصل از مطالعات عددی ردیاب همان طور که در فصل دوم توضیح داده شد منجر به یافتن ویژگی‌های هیدرودینامیک جریان عبوری از حوضچه و محاسبه‌ی فاکتورهای عملکرد هیدرولیکی ارائه شده در فصل دوم می‌شود.

در بخش قبلی با تجزیه و تحلیل منحنی زمان ماند شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی موجود در حوضچه‌ها تفسیر شد و در این بخش به ارزیابی فاکتورها و پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌ها، با استفاده از منحنی زمان ماند پرداخته می‌شود. در جدول ۳-۴ تمامی فاکتورهای لازم جهت ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌ها بر اساس منحنی‌های زمان ماند هر چهار هندسه در شکل ۴-۱۳ محاسبه و ارائه شده است.

جدول ۳-۴- مقایسه‌ی فاکتورها و پارامترهای ارزیابی عملکرد تصفیه برای هندسه‌های ۱ تا ۴

حوضچه‌های مورد بررسی	شاخص اتصال کوتاه (SCI)	زمان ماند متوسط (t_{mean})	زمان وقوع اولین پیک t_p	حجم موثر حوضچه (e)
هندسه ۱	۰/۰۵۸	۸/۸۳	۱/۶۳	۰/۲۲
هندسه ۲	۰/۰۶۲	۱۱/۶۵	۲/۰۱۱	۰/۲۸
هندسه ۳	۰/۰۷۴	۱۲	۲/۲۶	۰/۲۹
هندسه ۴	۰/۰۹۵	۱۳/۵۳	۳/۰۱۱۸	۰/۳۳

اولین پارامتر محاسبه شده از منحنی زمان ماند در شکل ۴-۱۳، شاخص اتصال کوتاه SCI است. برای هر چهار هندسه در جدول ۳-۴ گزارش شده است. این شاخص در محدوده ۰ تا ۱ تغییر می‌کند و با شدت اتصال کوتاه در حوضچه نسبت عکس دارد، بنابراین متناسب با راندمان هیدرولیکی است (Ouedraogo, Zhang et al. 2016).

همان طور که در جدول ۳-۴ گزارش شده است، شاخص اتصال کوتاه در هندسه اول، هندسه دوم، هندسه سوم و در هندسه چهارم به ترتیب برابر با ۰/۰۵۸، ۰/۰۶۲، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۹۵ محاسبه شده است. هندسه اول مربوط به حوضچه بدون انباشت لجن در سال ۲۰۰۶ است (Lizima 2013). کمترین شاخص اتصال کوتاه متعلق به این حوضچه است، بنابراین هندسه اول دارای قویترین اتصال کوتاه است. در هندسه دیگر اثر توزیع کننده‌های عمقی در نظر گرفته می‌شود از هندسه دوم تا چهارم به ترتیب شاخص اتصال کوتاه رو به افزایش است همانطور که از تجزیه و تحلیل قبلی در شکل ۴-۱۰ (الف-پ-ث) انتظار می‌رود تزریق جریان از توزیع کننده‌های تعبیه شده در کف تا حدی منجر به اختلاط در جریان می‌شود و از تشکیل مناطق رکود و مرده در حوضچه جلوگیری می‌کند. هندسه چهارم با توجه به بیشتر بودن تعداد توزیع کننده در کف حوضچه و همچنین کم بودن فاصله بین آن‌ها دارای ضعیف‌ترین اتصال کوتاه است. بعلاوه در این هندسه اتصال کوتاه یا مسیر میان بر کمتر از هندسه دیگر ایجاد می‌شود. این نتایج با وقوع دیرتر نقطه اوج در منحنی زمان ماند هندسه چهارم مطابقت دارد.

با توجه به اینکه اتصال کوتاه یکی از بزرگ‌ترین موانع در طراحی موفق حوضچه‌های تثبیت فاضلاب محسوب می‌شود. بنابراین کاهش این پدیده در هندسه چهارم همان طور که در شکل ۴-۱۰ (ث-ج) مشاهده شد باعث جلوگیری از ایجاد فضای مرده در حوضچه، افزایش کارایی و راندمان هیدرولیکی حوضچه می‌شود.

بر اساس جدول ۳-۴ مشاهده می‌شود با کمک CFD متوسط زمان ماند قابل پیش‌بینی و محاسبه است بنابراین متوسط زمان ماند در چهار هندسه به ترتیب ۸/۸۳، ۱۲، ۱۱/۶۵، ۱۳/۵۳ برآورد شده است.

در شکل ۴-۱۳ هنگامی منحنی زمان ماند به نقطه اوج می‌رسد که حداکثر غلظت ردیاب از مقطع خروجی حوضچه خارج شود. زمان رسیدن به نقطه‌ی اوج در چهار هندسه مورد نظر به ترتیب

۱/۶۳، ۲/۰۱۱، ۲/۲۶ و ۳/۰۱۱۸ روز می‌باشد. هندسه اول زودتر از هندسه‌های دیگر به نقطه اوج می‌رسد. در این هندسه در یک مدت زمان کم نسبت به هندسه‌های دیگر، ردیاب به سرعت از مقطع ورودی به مقطع خروجی، جریان پیدا می‌کند و پخش‌دگی جریان کم است. بنابراین شدت ایجاد اتصال کوتاه در این هندسه بیش‌تر است، در نتیجه عدم یکنواختی جریان و تصفیه نامناسب پساب را به دنبال دارد. زمان رسیدن به نقطه‌ی اوج در هندسه دوم که دارای ۲۸ توزیع کننده عمقی است کمی بیشتر از هندسه اول (فاقد توزیع کننده) بوده این موضوع ناشی از اختلاط به وجود آمده در جریان توسط توزیع کننده است، طوری که در هندسه سوم که فاصله‌ی بین توزیع کننده‌ها کم و تعداد توزیع کننده‌ها (۵۵) بیشتر از حالت قبلی است به مراتب نقطه‌ی اوج دیرتر اتفاق می‌افتد. در هندسه چهارم نسبت به هندسه سوم تعداد توزیع کننده‌ها (۱۶۰) بیشتر است بعد از گذشت ۳/۰۱۱۸ روز منحنی زمان ماند به نقطه اوج می‌رسد بنابراین شدت تشکیل اتصال کوتاه در این حوضچه کم‌تر می‌گردد و ردیاب فرصت کافی برای پخش یکنواخت در حوضچه را داشته است.

بنابر توضیحات ارائه شده در فصل دوم، مهم‌ترین فاکتور ارزیابی عملکرد هیدرولیکی، حجم موثر حوضچه می‌باشد. هر چه حجم موثر به یک نزدیک‌تر باشد نمایانگر بهینه بودن عملکرد هیدرولیکی حوضچه است.

در جدول ۳-۴ حجم موثر هندسه‌های مختلف محاسبه شده است. به طوری که حجم موثر و مفید در هندسه اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۲۸، ۰/۲۹ و ۰/۳۳ می‌باشد. بیش‌ترین حجم موثر متعلق به هندسه‌ی چهارم است بنابراین در هندسه اول بدون حضور توزیع کننده، کم‌ترین حجم موثر وجود دارد. در این حوضچه با توجه به کم بودن حجم مفید نسبت به هندسه‌های دیگر اختلاط جریان کم‌تر رخ داده است و فضای مرده یا ناحیه‌ی راکد در این حوضچه بیش‌تر تشکیل می‌شود این موضوع با شکل ۴-۴ مطابقت دارد به طوری که در سه ناحیه منطقه مرده مشاهده شده است بعلاوه عملکرد هیدرولیکی این حوضچه کم‌تر از سایر حوضچه‌ها است.

بیشترین حجم موثر مطابق جدول ۳-۴ متعلق به هندسه چهارم، ۰/۳۳ است. بنابراین نسبت به سه هندسه دیگر مناطق مرده یا ناحیه رکود و منطقه گردشی کمتری در این هندسه شکل می گیرد شکل ۴-۱۰ (ج) گویای این امر است. به علت تعداد زیاد و فواصل کم بین توزیع کننده ها تقریباً در تمام قسمت کف حوضچه جریان از توزیع کننده ها وارد می شود بعلاوه منجر به اختلاط بیشتر جریان در حوضچه می شود از تشکیل نواحی راکد و مرده جلوگیری می کند در نتیجه باعث می شود پخش جریان در حوضچه یکنواخت تر شود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

در این فصل به بیان نتایج به دست آمده از این پژوهش پرداخته می‌شود. از آنجایی که هدف از انجام این پژوهش، بررسی عددی اثر میکرو نانو حباب تزریق شده به صورت نقطه ای از کف حوضچه تثبیت فاضلاب بر روی توزیع یکنواخت و عملکرد هیدرولیکی حوضچه است، نحوه ی پخش میکرو نانو حباب در جریان فاضلاب توسط توزیع کننده‌های عمقی تعبیه شده در حوضچه در شرایط مختلف شبیه‌سازی و حل شد و توزیع یکنواخت‌تر جریان در حوضچه بررسی شد. پس از ارزیابی و تحلیل‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

- استفاده از شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی دینامیک سیالات محاسباتی برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی هیدرولیک حوضچه‌های تثبیت فاضلاب بسیار موثر است و قادر به برآورد توزیع جریان در حوضچه، شبیه‌سازی آزمایش ردیاب و میانگین زمان ماند می‌باشند. بنابراین از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی اثر سناریوهای مختلف و آرایش متنوع توزیع کننده‌ها بر روی عملکرد هیدرولیکی و الگوهای هیدرودینامیکی جریان داخل حوضچه می‌توان استفاده کرد.
- آزمایش و مطالعات عددی ردیاب در حوضچه، جهت درک رفتار هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب بسیار ارزشمند است. با استخراج منحنی زمان ماند مربوط به هر چهار هندسه شرایط هیدرولیکی حاکم در حوضچه بررسی شد. در واقع با وقوع زودتر و نقطه اوج بالاتر غلظت ردیاب، در منحنی زمان ماند امکان ایجاد مسیر میان‌بر و یا اتصال کوتاه در حوضچه بیشتر می‌شود و منحنی پس از رسیدن به نقطه اوج کاهش پیدا می‌کند به طوری که رفتار جریان درون حوضچه با اختلاط کامل جریان مشابه است. در هندسه اول نقطه اوج زودتر و بالاتر از سایر هندسه‌ها رخ داده است در حالی که در هندسه چهارم با حضور توزیع کننده‌ها منحنی زمان ماند دیرتر به نقطه اوج رسیده است و این نقطه پایین تر از سایر هندسه‌ها است.

- طراحی ضعیف حوضچه‌های تثبیت فاضلاب تأثیر قابل توجهی بر راندمان تصفیه فاضلاب را به دنبال دارد. در واقع مشکلات هیدرودینامیکی مانند مسیرهای میان بر در بسیاری از حوضچه‌ها وجود دارند و منجر به عملکرد ضعیف حوضچه‌ها می‌شود. در این پژوهش با مقایسه‌ی هندسه اول، فاقد توزیع کننده عمقی و هندسه دوم، دارای ۲۸ توزیع کننده یک اینچی این نتیجه حاصل شد که تعبیه توزیع کننده‌ها در عمق حوضچه باعث بیشتر شدن شاخص اتصال کوتاه در حوضچه می‌شود. بعلاوه مسیرهای میان بر و اتصال کوتاه در حوضچه کاهش یافته است.
- با مقایسه‌ی هندسه‌های دوم، سوم و چهارم (در هر سه هندسه توزیع کننده عمقی تعبیه شده است) می‌توان نتیجه گرفت با نزدیک بودن توزیع کننده‌ها در کف مخزن پخش یکنواخت‌تر جریان حاصل می‌شود به طوری که بیشترین شاخص اتصال کوتاه در هندسه چهارم به دست آمده است و عملکرد هیدرولیکی در این حوضچه با افزایش توزیع کننده‌های عمقی بیشتر شده است.
- بخشی از حجم حوضچه که اختلاط جریان و واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی در آن قسمت انجام می‌شود، حجم فعال و یا موثر حوضچه را تشکیل می‌دهد. در هندسه اول بدون حضور توزیع کننده عمقی، حجم کمی از کل حجم حوضچه به این بخش اختصاص یافته است در حالی که در هندسه‌های دوم، سوم و چهارم با افزایش تعداد توزیع کننده‌ها و همچنین با کم شدن فاصله بین آن‌ها حجم موثر در حوضچه رو به افزایش است. این امر گویای این موضوع است که با تزریق جریان از توزیع کننده‌های عمقی اختلاط جریان در حوضچه بهتر انجام می‌شود. در نتیجه حجم فضاهای مرده و نواحی راکد حوضچه در هندسه اول به کمک توزیع کننده‌های عمقی کاهش پیدا کرده است. بعلاوه با توجه به اینکه میزان حجم مرده نقش مهمی در افت عملکرد هیدرولیکی حوضچه ایفا می‌کند می‌توان نتیجه گرفت هندسه چهارم بهترین عملکرد هیدرولیکی را داشته است.

- حضور توزیع کننده‌های عمقی باعث توزیع مومنتوم در جریان درون حوضچه شده است بعلاوه از تشکیل مناطق رکود و مرده در حوضچه جلوگیری می‌شود و باعث افزایش حجم موثر حوضچه می‌شود بنابراین با توجه به تأثیر الگوی جریان بر توپولوژی انباشت لجن در حوضچه می‌توان نتیجه گرفت مانع از انباشت لجن در حوضچه می‌گردد بنابراین ظرفیت تصفیه افزایش می‌یابد.
- با مقایسه هندسه اول و دوم می‌توان نتیجه گرفت، توزیع کننده‌های عمقی نقش مهمی در تعیین راندمان هیدرولیکی حوضچه دارند. بعلاوه با مقایسه‌ی دوم، سوم و چهارم می‌توان به اثر آرایش توزیع کننده‌ها بر راندمان هیدرولیکی حوضچه پی برد به گونه ای که راندمان هیدرولیکی در هندسه چهارم با توجه به تعداد و فاصله بین توزیع کننده‌ها نسبت به هندسه سوم، بسیار بیشتر برآورد شده است.

- حضور اکسیژن و عملیات هوادهی در فرایند تصفیه فاضلاب یکی از عناصر حیاتی و ضروری است. معمولاً تأسیسات تصفیه فاضلاب برای افزایش میزان اکسیژن محلول و گردش بیشتر آب از سیستم هوادهی عمقی استفاده می‌کنند. دیفیوژرهای هوادهی عمقی، حباب‌های هوا یا حباب های اکسیژن خالص را در عمق آزاد می‌کند از معایب این روش هزینه‌های بالای مصرف انرژی است. از این رو با توجه به خواص فیزیکی میکرو نانو حباب‌ها در انتقال بالای اکسیژن در محیط‌های آبی با تزریق آن توسط توزیع کننده‌های عمقی در حوضچه‌ها علاوه بر افزایش عملکرد هیدرولیکی عملیات هوادهی و اختلاط در حوضچه با حداقل مصرف انرژی در حوضچه انجام می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت که استفاده از توزیع کننده‌های عمقی، فاکتور مهمی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های تثبیت فاضلاب محسوب می‌شود و منجر به یکنواختی جریان در حوضچه، افزایش عملکرد حوضچه و تصفیه بهتر فاضلاب در حوضچه می‌گردد.

۵-۲ پیشنهادها

در رابطه با تحقیق‌های آینده موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- بررسی اثر موقعیت مقاطع ورودی‌های مختلف، توأم با توزیع کننده‌های عمقی
- ۲- بررسی اثر توأم دیواره‌میانی و توزیع کننده‌های عمقی در راستای بهبود عملکرد هیدرولیکی حوضچه-ها
- ۳- مدل‌سازی آزمایشگاهی نتایج به دست آمده از روش عددی
- ۴- بررسی عملکرد جت‌های تزریق به جای توزیع کننده‌های متعدد

منابع

- حسینیان، م.، (۱۳۸۲). اصول طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و پساب صنعتی. انتشارات شهر آب و آیندسازان
- شریعت پناهی، م (۱۳۹۱). اصول کیفیت و تصفیه آب و فاضلاب، دانشگاه تهران، موسسه انتشارات و چاپ.
- علوی مقدم، م.، صدری مقدم، ش. (۱۳۹۲). تصفیه فاضلاب: مفاهیم، روش‌های فیزیکی و شیمیایی تصفیه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ندافی، ک، نبی زاده نودهی، ر (۱۳۷۵). برکه‌های تثبیت فاضلاب: اصول طراحی و اجراء، موسسه علمی فرهنگی نصر.
- Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84(9), 1175-1180 .
- Alvarado, A., Sanchez, E., Durazno, G., Vesvikar, M., & Nopens, I. (2012b). CFD analysis of sludge accumulation and hydraulic performance of a waste stabilization pond. *Water Science and Technology*, 66(11), 2370-2377 .
- Alvarado, A., S. Vedantam, P. Goethals and I. Nopens (2012a). "A compartmental mode to describe hydraulics in a full-scale waste stabilization pond." Water research 46(2): 521-530.
- Atkins, P., & De Paula, J. (2006). Physical Chemistry: Thermodynamics, structure, and change 8th ed: Oxford: Oxford University Press.
- Bergman, D. (2012). Study of the coupled interaction between the wake's transient behavior and pressure surfaces upstream using Detached Eddy Simulation.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: principles and design*: John Wiley & Sons.
- DeCoursey, W. (2003). *Statistics and probability for engineering applications*: Elsevier.
- DeMoyer, C. D., Schierholz, E. L., Gulliver, J. S., & Wilhelms, S. C. (2003). Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems. *Water research*, 37(8), 1890-1904 .
- Eddy, M. (1979). Wastewater Engineering-Treatment, Disposal, Reuse .INC, 473 .
- Fischer, H. B., List, J. E., Koh, C. R., Imberger, J., & Brooks, N. H. (2013). *Mixing in inland and coastal waters*: Elsevier.
- Li, P., Takahashi, M., & Chiba, K. (2009). Enhanced free-radical generation by shrinking microbubbles using a copper catalyst. *Chemosphere*, 77(8), 1157-1160 .

- Liu, S., Wang, Q., Ma, H., Huang, P., Li, J., & Kikuchi, T. (2010). Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater. *Separation and Purification Technology*, 71(3), 337-346 .
- Lizima, L. (2013). Hydraulic evaluation of a community managed wastewater stabilization pond system in Boliv .Master's Thesis, University of South Florida.
- Mara, D. (2013). *Domestic wastewater treatment in developing countries*: Routledge.
- Mara, D. D., & Pearson, H. (1987). Waste stabilization ponds: design manual for Mediterranean Europe *Waste stabilization ponds: design manual for Mediterranean Europe*: World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Metcalf, F. (2003). Waste water engineering: treatment and reuse. 4th edn. Revised by Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD: McGraw-Hill, New York.
- Muga, H. E., & Mihelcic, J. R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of environmental management*, 88(3), 437-447 .
- Ouedraogo, F. R., Zhang, J .,Cornejo, P. K., Zhang, Q., Mihelcic, J. R., & Tejada-Martinez, A. E. (2016). Impact of sludge layer geometry on the hydraulic performance of a waste stabilization pond. *Water research*, 99, 253-262 .
- Passos, R. G., von Sperling, M., & Ribeiro, T. B. (2014).(Hydrodynamic evaluation of a full-scale facultative pond by computational fluid dynamics (CFD) and field measurements. *Water Science and Technology*, 70(3), 569 .
- Persson, J., Somes, N. L. G., & Wong, T. H. F. (1999). Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water science and technology*, 40(3), 291–299
- Persson, J. (2000). The hydraulic performance of ponds of various layouts. *Urban Water*, 243-250.
- Peterson, E. L., J. A. Harris and L. C. Wadhwa (2000). "CFD modelling pond dynamic processes." *Aquacultural Engineering* 23(1-3): 61-93.
- Shilton, A. (2000). Potential application of computational fluid dynamics to pond design. *Water Science and Technology*, 42(10-11), 327 .
- Shilton, A., & Harrison, J. (2003). Development of guidelines for improved hydraulic design of waste stabilisation ponds. *Water Science and Technology*, 48(2), 173-180 .
- Shilton, A., Kreegher, S., & Grigg, N. (2008). Comparison of computation fluid dynamics simulation against tracer data from a scale model and full-sized waste stabilization pond. *Journal of Environmental Engineering*, 134(10), 845-850 .

- Sanieinejad, M. (2009). Fundamentals of turbulent flows and turbulence modeling. *Daneshnegar, Tehran* .
- Stamou, A., E. Adams and W. Rodi (1989). "Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers." *Journal of hydraulic research* **27**(5): 665-682
- Takahashi, M. (2005). potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas– water interface. *The Journal of Physical Chemistry B*, **109**(46), 21858-21864 .
- Takahashi, M. (2009). Base and technological application of micro-bubble and nanobubble. *Materials Integration*, **22**(5), 2-19 .
- Takahashi, M., Chiba, K., & Li, P. (2007). Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus. *The Journal of Physical Chemistry B*, **111**(6), 1343-1347 .
- Takahashi, M., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Ohnari, H., Himuro, S., & Shakutsui, H. (2003). Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation. *The Journal of Physical Chemistry B*, **107**(10), 2171-2173 .
- Thackston, E .L., Shields Jr, F. D., & Schroeder, P. R. (1987). Residence time distributions of shallow basins. *Journal of Environmental Engineering*, **113**(6), 1319-1332 .
- Tsuge, H. (2014). *Micro-and nanobubbles*: Pan Stanford.
- Ushikubo, F. Y., Furukawa, T., Nakagawa, R ,Enari, M., Makino, Y., Kawagoe, Y., Oshita, S. (2010). Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **361**(1-3), 31-37 .
- Verbyla, M. E., Oakley, S. M., Lizima, L. A., Zhang, J., Iriarte, M., Tejada-Martinez, A. E., & Mihelcic, J. R. (2013a). Taenia eggs in a stabilization pond system with poor hydraulics: concern for human cysticercosis *Water Science and Technology*, **68**(12), 2698 .
- Verbyla, M. E., Oakley, S. M., & Mihelcic, J. R. (2013b). Wastewater infrastructure for small cities in an urbanizing world: integrating protection of human health and the environment with resource recovery and food security. *Environmental science & technology*, **47**(8), 3598-3605 .
- Versteeg, H. and W. Malalasekera (1995). "Computational fluid dynamics." The finite volume method

- Wood, M., Greenfield, P., Howes, T., Johns, M., & Keller, J. (1995). Computational fluid dynamic modelling of wastewater ponds to improve design. *Water Science and Technology*, 31(12), 111-118 .
- Wood, M., Howes, T., Keller, J., & Johns, M. (1998). Two dimensional computational fluid dynamic models for waste stabilisation ponds. *Water research*, 32(3), 958-963 .
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2): DCW industries La Canada, CA.
- WEF (Water Environment Federation), 2008, *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants*, 6th edition, Mc Graw-Hill, New York
- Wilcox, D. C. (1998). Turbulence modeling for CFD, DCW industries La Canada, CA.
- Wood, M., P. Greenfield, T. Howes, M. Johns and J. Keller (1995). "Computational fluid dynamic modelling of wastewater ponds to improve design." Water Science and Technology **31**(12): 111-118.
- Yamasaki, K., Sakata, K., & Chuhjoh, K. (2010). Water treatment method and water treatment system: Google Patents.
- Yamasaki, K., Uda, K., & Chuhjoh, K. (2009). Wastewater treatment equipment and method of wastewater treatment: Google Patents.
- Zhang, J., Tejada-Martínez, A., & Zhang, Q. (2013). Hydraulic efficiency in RANS of the flow in multichambered contactors. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), 1150-1157 .
- Zhang, J., Tejada-Martínez, A. E., & Zhang, Q. (2014a). Evaluation of large eddy simulation and RANS for determining hydraulic performance of disinfection systems for water treatment. *Journal of Fluids Engineering*, 136(12), 121102 .
- Zhang, J., Tejada-Martínez, A. E., Zhang, Q., & Lei, H. (2014b). Evaluating hydraulic and disinfection efficiencies of a full-scale ozone contactor using a RANS-based modeling framework. *Water research*, 52, 155-167 .

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of deep Distributor on the hydraulic performance of Wastewater Stabilization Pond. For this purpose, computational fluid dynamics (CFD) models have been used to analysis hydrodynamic of the ponds. In this study, four Wastewater Stabilization Pond with different formation was designed to create a momentum for aeration from the floor. The first geometry had not a deep distributor, but other geometries had 28, 55, and 160 distributors, respectively. The cross-section area, the volume of the ponds, and the input flow were considered the same in all conditions. For numerical simulating, OpenFoam has been used which is open-source software. In this simulation, a constant flow, turbulent regime and the K- ϵ turbulence model had been used. The results showed that the use of deep distributors in sewage stabilization basins has a significant effect on the efficiency and hydraulic performance of the basins. The analysis of the residence time distribution (RTD) curves illustrated that the use of deep distribution leads to uniformity of distribution in the flow of the basin. In fact, by mixing the flow more and preventing the formation of intermediate paths, the flow behavior becomes closer to the reactor plug flow, thereby increasing the purification efficiency in the pond. On the other hand, due to the direct effect of the flow pattern on how the sludge accumulation in the pond, as a result of an increase in effective volumes the use of distributors will reduce dead areas, so the purification capacity increases. According to the results obtained from this study, the use of deep distributor systems and micro-nano bubble injection in the pond can improve the hydraulic performance and ultimately improve the purification efficiency.

Keywords: OpenFoam Software, Wastewater Stabilization Pond, Computational Fluid Dynamics, Hydraulic Performance, Deep Distributor, Micro-Nano bubble, Turbulent Flow.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc.Thesis in Hydraulic Structure

**Numerical investigation on the point input flow in open
reservoir a case study on injection of nanobubbles in sewage
stabilization pond.**

By:

Maryam Khezli

Supervisor:

Dr. Seyed Fazlolah Saghravani

January 2019