

شبیه‌سازی اثر پیکربندی و تعداد بافل‌ها بر کارایی هیدرولیکی مخازن تماسی کلر

مهدی اسدی آقبلاغی^{۱*}، مهسا اسماعیلی^۲، روح‌الله فتاحی^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

^۲ کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(دریافت: ۹۹/۸/۲۲، پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۲۸)

چکیده

کلر و شکل‌های مختلف آن اکسیدهای قدرتمندی هستند، که اکثر جانداران بیماری‌زا را که برای زندگی انسان و حیوان مضر هستند، از بین می‌برد. سیستم‌های تماسی کلر با برقراری زمان تماس مناسب، واکنش‌های شیمیایی را برای غیرفعال‌سازی موجودات بیماری‌زا فراهم می‌کند و در نتیجه آب را ضدعفونی می‌کند. این مخازن معمولاً محفظه‌های باز هستند که توسط یکسری از بافل‌ها (Baffle) تقسیم شده‌اند. در واقع بافل‌ها یا دیواره‌های داخلی مخزن برای به حداقل رساندن پدیده اتصال کوتاه و اختلاط بهتر کمک می‌کنند. از لحاظ تاریخی بررسی مخازن تماسی کلر توسط روابط تجربی، مطالعات مدل فیزیکی یا مطالعات ردیاب پس از ساخت مخزن تماسی بوده است. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و مطالعات مربوط به ماده ردیاب بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. در سال‌های اخیر مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی جریان و فرآیندهای انتقال املاح در مخازن تماسی به کار برده شده است؛ که بهترین روش برای طراحی مخازن تماسی قبل از ساخت می‌باشد. در این پژوهش به شبیه‌سازی سه‌بعدی مخزن ضدعفونی تماسی CT-1، بررسی پیکربندی آرایش جدید بافل‌ها در مخزن MS4-C و همچنین به بررسی اثر تعداد بافل‌ها بر روی کارایی هیدرولیکی مخازن تماسی در پنج حالت با استفاده از نرم‌افزار کامسول COMSOL Multiphysics 5.3a پرداخته می‌شود. نتایج نشان داد: آرایش جدید بافل‌ها در مخزن MS4-C موجب بهبود در کارایی هیدرولیکی مخزن تماسی می‌شود و همچنین افزایش تعداد بافل‌ها در محدوده ۹ تا ۱۱ بافل موجب بهبود در کارایی هیدرولیکی مخزن تماسی CT-1 شده و بیشتر از ۱۱ بافل روند منفی بر کارایی هیدرولیکی مخزن تماسی داشته است.

کلیدواژه‌ها: کلر، مخازن تماسی، بافل، پیکربندی، کارایی هیدرولیکی.

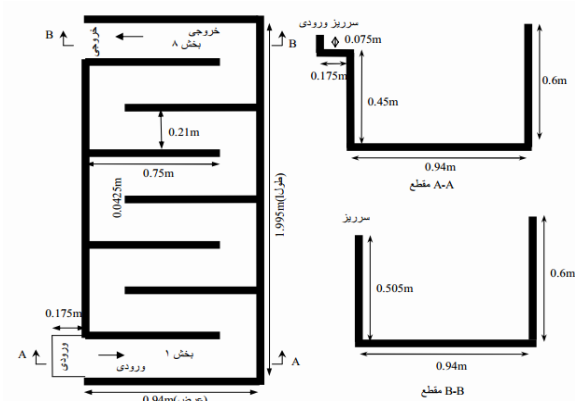
۱- مقدمه

قاعده $C \times T$ اندازه‌گیری می‌شود. که C کم‌ترین باقی‌مانده مواد ضدعفونی‌کننده اندازه‌گیری شده در خروجی مخزن و T حداقل زمان تماس است. با توجه به این رویکرد محصول $C \times T$ باید از یک مقداری بیشتر باشد که بستگی به نوع ضدعفونی‌کننده، pH و درجه حرارت دارد. قاعده $C \times T$ اغلب نیاز به استفاده از T_{10} به عنوان نماینده زمان ماند هیدرولیکی دارد. T_{10} زمان ماند ۱۰٪ اول میکروارگانیسم‌ها برای حرکت از میان مخزن می‌باشد؛ همان‌طور که از توزیع زمان ماند ردیاب (RTD)^۲ تعیین شده است. به عبارت دیگر T_{10} ، ۱۰ درصد RTD است. در مخازن تماسی واقعی T_{10} کوتاه‌تر از میانگین زمان ماند هیدرولیکی می‌باشد؛ که از تقسیم حجم مخزن بر نرخ جریان آب به دست می‌آید. بنابراین، یک راه برای رعایت معیارهای ضدعفونی می‌تواند افزایش دوز کلر باشد اما این نیز هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد و ممکن

ضدعفونی یک فرآیند طراحی شده برای غیرفعال کردن جانداران بیماری‌زا و در نتیجه جلوگیری از انتقال بیماری‌های آبی می‌باشد. مواد شیمیایی مانند محلول‌های آبی کلر، دی‌اکسید کلر، هیپوکلریت سدیم، هیپوکلریت کلسیم، ازون یا ترکیبی از آنهاست. جنبه مهم ضدعفونی شیمیایی طراحی حوضچه تماسی کلر است. دوز مواد ضدعفونی‌کننده در واحد غلظت (C) و تماس موردنیاز داده شده در واحد زمان (T) است. بنابراین مقدار مواد ضدعفونی‌کننده موردنیاز (CT) می‌باشد (Trevor و Neil، ۲۰۱۰). هدف اصلی مخازن تماسی کلر فراهم کردن زمان مناسب ماند برای هردو میکروارگانیسم‌ها^۱ (جانداران بیماری‌زا) و مواد ضدعفونی‌کننده برای رسیدن به درجه مطلوب غیرفعال شدن میکروب‌ها می‌باشد. رسیدن به ضدعفونی مناسب به‌طور کلی توسط

چنین مدل‌های آزمایشگاهی معمولاً معرف خصوصیات جریان در مدل اصلی می‌باشد. مطالعه او شامل تعیین توزیع سرعت و غلظت در مخازن بود. مخزن تماسی امبسی^۴، یک مخزن زیرزمینی است؛ که در یورکشایر^۵ غربی، در انگلستان قرار دارد و توسط سازمان آب یورکشایر اداره و بهره‌برداری می‌گردد. این مخزن به شکل مارپیچ می‌باشد و دارای هشت بخش است نقشه آن در شکل (۱) نشان داده شده است (امینی و تقی‌پور ۱۳۸۸).

این مخزن از تخته چندلایه به ضخامت ۱/۷ سانتی‌متر در عرض ۰/۹۴ متر و ارتفاع ۰/۱۶ متر و طول دو متر ساخته شد. این مخزن دارای ۷ بافل^۶ (دیواره) می‌باشد؛ که در طول آن قرار گرفته و در نتیجه موجب ایجاد جریان مارپیچی می‌گردد. بافل‌ها از تخته چندلایه به ضخامت ۱/۲ سانتی‌متر و طول ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۱۶ متر و ضخامت ۴/۵ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. شدت جریان در مخزن تماسی بر اساس تشابه فرودی در مخازن واقعی و آزمایشگاهی برابر ۱/۱۷ لیتر بر ثانیه در مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. با این شدت جریان عمق متوسط جریان در مخزن ۵۳۶ میلی‌متر و سرعت متوسط در مقطع عرضی ۱۰/۴mm/s گردید. سرعت‌های لحظه‌ای به وسیله یک سرعت‌سنج لیزری اندازه‌گیری شد. در ادامه مدل عددی $k-\epsilon$ با استفاده از روش آشفتگی برای این مخزن به کار گرفته شد. نتایج نشان داد؛ که تشابه خوبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این روش برای مدل کردن جریان در مخازن تماسی مناسب می‌باشد. جریان چرخشی که در مدل‌های آزمایشگاهی وجود دارد با استفاده از روش هیدرودینامیک به خوبی در مدل عددی شبیه‌سازی شد؛ در صورتی که روش‌های هیدرواستاتیک نمی‌توانند چنین چرخشی را مدل نمایند. بنابراین این روش برای مدل کردن جریان‌هایی شبیه به جریان مخازن تماسی که در آن‌ها سطح مایع تقریباً افقی است مناسب می‌باشد (امینی و تقی‌پور، ۱۳۸۸)



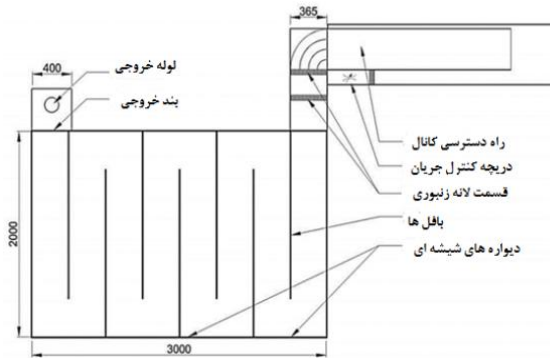
شکل ۱- مخزن تماسی امبسی (امینی و تقی‌پور، ۱۳۸۸)

است منجر به افزایش محصولات جانبی ناشی از گندزدایی (DBPs) شود، که مطلوب نیستند. بنابراین بهترین راه برای بهینه‌سازی اثر بخشی مواد ضد عفونی، افزایش مقدار T_{10} همراه با کاهش دوز مواد ضد عفونی کننده مورد نیاز است. برای رسیدن به این هدف محفظه می‌تواند بزرگ شود که باعث حجم ذخیره سازی اضافی با هزینه ساخت و ساز بالاتر و تعمیر و نگهداری بیشتر می‌شود. یک راه مقرون به صرفه برای افزایش T_{10} به حداکثر رساندن الگوهای جریان یکنواخت است (Gualtieri, 2007).

عملکرد تأسیسات تصفیه آب با توجه به معرفی استانداردهای بیشتری در مورد کیفیت آب، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی واحدهای مخزن تماسی (CT) که اجزای جدایی ناپذیر از گندزدایی آب را تشکیل می‌دهند، نشان می‌دهد که؛ جریان پلاگ^۳ به عنوان شرایط ایده آل هیدرودینامیکی است که در آن عملکرد ضد عفونی به حداکثر می‌رسد. در جریان پلاگ تمام عناصر مایع به صورت یکنواخت از میان، مخزن عبور می‌کنند. شرایط جریان پلاگ برای حمل مواد ضد عفونی کننده ایده آل است، زیرا ذرات در یک فاصله زمانی یکنواخت برای فرآیند ضد عفونی مؤثر در مخزن باقی می‌مانند. بر این اساس طراحی هیدرولیک مخازن تماسی CTS به طور سنتی بر این فرض استوار است که زمان تماس برای همه عناصر مایع با هیدرولیک زمان تئوری ماند (T) مطابقت دارد. که زمان ماند می‌تواند تخمین زده شود؛ به صورت $T=V/Q$ که در آن V حجم مخزن تماسی CT و Q دبی هست (Angeloudis و همکاران، 2014).

سهولت حمل و نقل، اندازه‌گیری و کنترل، هزینه کم نصب و راه‌اندازی و مهم‌تر از همه کنترل غلظت باقی مانده از کلر پس از تصفیه از مزایای استفاده از روش کلر زنی بوده و هم چنین کلر باقی مانده مانع از آلودگی مجدد منبع آب در سیستم توزیع می‌گردد. با این حال استفاده ناکارآمد از کلر برای ضد عفونی آب آشامیدنی باعث نگرانی شده است. از جمله: تشکیل ترکیبات سرطان‌زا شامل (DBPs) که از کلر باقی مانده اضافی در مخازن تماسی تصفیه کلر به وجود می‌آید. وضع قوانین جدید در مورد آب آشامیدنی و تحمیل مقررات سخت گیرانه به منظور کاهش اثرات عملیات تصفیه و سطح آلاینده‌ها، بررسی بر عملکرد تجهیزات تصفیه آب از جمله مخازن تماسی کلر (CCTs) لازم است (Rauen و همکاران، 2012).

Texira (1993) آزمایشات زیادی را روی مدل آزمایشگاهی این نوع مخازن در مقیاس ۱:۸ در جهات افقی و قائم به انجام رساندند؛ که این نسبت عموماً برای چنین مطالعه فیزیکی بسیار بزرگ دانسته می‌شود. تحلیل عددی و مدل سازی این نوع مخازن بعدها توسط نرم افزار صورت گرفت. بنابراین خصوصیات جریان در



شکل ۳- مشخصات طرح و ابعاد اصلی (Angeloudis, ۲۰۱۴)

در تنظیمات دیواره‌های داخلی، بافل هشت محفظه‌ای برای آزمایش تجربی هیدروینامیکی^{۱۰} و انتقال املاح در نظر گرفته شد. که یک نمونه مشخصی از طراحی یک مخزن تماسی مارپیچی است. این مخزن با قرار دادن ۷ دیواره صاف (بافل) که از تخته سه‌لایه با ابعاد $۱/۲ \times ۱/۶۳ \times ۰/۱۲$ متر ساخته شده است، به هشت محفظه با عرض برابر $۰/۳۶۵$ متر تقسیم شده است. میزان جریان تولیدشده در طول آزمایش مدل فیزیکی توسط پمپ‌های سانتریفیوژ^{۱۱} Q برابر با $۴/۷۲$ لیتر بر ثانیه بود. مطابق با ابعاد CT-1 و دبی، زمان تئوری ماند ($TDT=V/Q$) برابر با ۱۲۶۵ ثانیه بود. سطح آب (H_t) در $۱/۰۲$ متر اندازه‌گیری شد؛ درحالی‌که میزان سرعت حجمی $۱۲/۵$ میلی‌متر بر ثانیه (U_b) بود. متوسط عدد رینولدز (Re) با توجه به شعاع هیدرولیکی محفظه و سرعت حجمی، Re تقریباً برابر با ۶۷۵۰ بود. از رنگ‌های فلورسنت مانند رودامین^{۱۲} WT برای ردیابی انتخاب شده است؛ زیرا آن‌ها تأثیر ناچیزی بر شرایط جریان دارند. این فرضیه در اینجا برای شبیه‌سازی میکروارگانیسم‌ها و انتقال مواد ناشی از گندزدایی گسترش یافته است؛ کل مفهوم کارایی هیدرولیکی در حال حاضر بر اساس این که پاتوژن‌ها^{۱۳} مسیرهای ردیابی محلول در راکتورهای ضدعفونی دنبال می‌کنند، ایجاد شده است (Angeloudis, ۲۰۱۴).

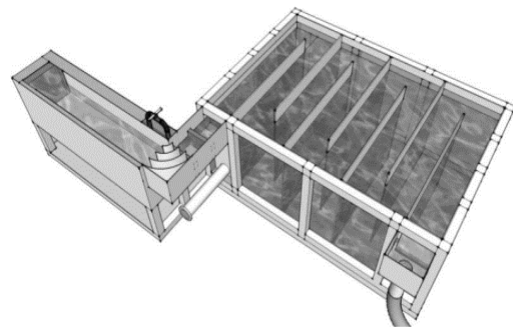
۲-۱- شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی

در این شبیه‌سازی هندسه موردنظر در محیط نرم‌افزار کامسول ترسیم شده است. مخزن به ابعاد $۳ \times ۲ \times ۱/۲$ متر، دارای ۷ دیواره به ابعاد $۱/۲ \times ۱/۶۳ \times ۰/۱۲$ متر و فاصله دیواره‌ها از هم با فاصله یکسان $۰/۳۶۵$ متر می‌باشد. همچنین سطح ورودی کانال به ابعاد $۰/۳ \times ۰/۳۶۵$ متر و ارتفاع آب $۱/۰۲$ است. شبکه تولیدشده در این شبیه‌سازی درشت^{۱۴} بوده است. شکل (۴) هندسه شبکه زده‌شده مخزن تماسی را نشان می‌دهد.

در این پژوهش به شبیه‌سازی سه‌بعدی مدل مخزن تماسی CT-1 با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس^۷ پرداخته می‌شود. مدل آزمایشی این مخزن واقع در آزمایشگاه هیدر^۸ مرکز تحقیقات آب و محیط‌زیست در دانشگاه کاردیف^۹ انگلستان می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی سه‌بعدی آرایش جدید بافل‌ها در مخزن MS4-C و اثر تعداد بافل‌ها در پنج حالت ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۱ بر کارایی هیدرولیکی مخزن انجام شد. منحنی توزیع زمان ماند (RTD) و منحنی جریان (FTC) برای هر حالت به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد آن‌ها استخراج شد.

۲- روش تحقیق

مدل مخزن تماسی (CT-1) بعد از مخزن تماسی CT در سال ۲۰۰۲ طراحی شده است و تحت نظارت اداره تصفیه آب یورکشایر کار می‌کند. اما تنوع آن قابلیت بالقوه‌ای را برای بررسی ویژگی‌های پیچیده‌تر هیدروینامیکی فراهم می‌کند. مخزن دارای ابعاد $۳ \times ۲ \times ۱/۲$ متر بوده است و از فولاد ساخته شده و به‌طور خاص برای پژوهش و اهداف مرتبط با مخازن تماسی کلر طراحی شده است. بخش‌های جانبی و دیواره‌های شمالی و جنوبی از شیشه ساخته شده است. تنظیمات بافل‌ها به‌طور خاص انعطاف‌پذیر است. بافل‌ها از تخته سه‌لایه ساخته شده است و آرایش آن‌ها با سهولت نسبی تغییر می‌کند. شکل (۲) و (۳) ویژگی‌های هندسی مخزن را نشان می‌دهند (Angeloudis, ۲۰۱۴).



شکل ۲- مدل هندسی مخزن تماسی CT-1 (Angeloudis, ۲۰۱۴)

11. Rhodamine
12. Pathogens
13. Coarse
14. Coarse

7. Comsol Multiphysics
8. Hyder
9. Cardiff
10. Centrifugal

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{6k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۴)$$

نهایتاً مقادیر ثابت مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ در جدول (۱) محاسبه می‌شود:

جدول ۱- پارامترهای مدل آشفتگی

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_{μ}	$6k$	6ε
۱/۴۴	۱/۹۲	۰/۰۹	۱/۰	۱/۳

معادلات (۳) و (۴)، چارچوب مدل $k-\varepsilon$ را تشکیل می‌دهند و به‌طور تکراری تا زمانی که k و ε حل در حوزه محاسباتی همگرا شوند، حل می‌شوند. در طول شبیه‌سازی، ویسکوزیته گردابی ν_t برای هر تکرار با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است. ترم آشفتگی با توجه به ویسکوزیته گردابی ν_t مطابق رابطه (۵) فرمول‌بندی شده است:

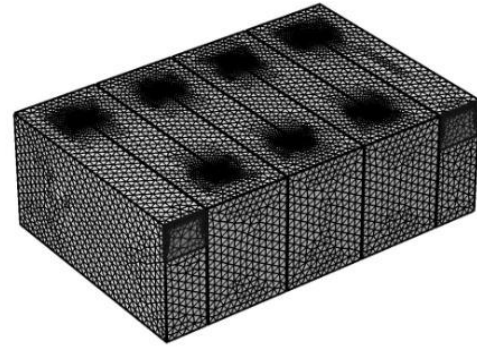
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(v + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (۵)$$

۲-۳- شرایط مرزی ورودی (دیریکله)

ساده‌ترین حالت شرایط مرزی، شرایط مرزی دیریکله^{۱۷} می‌باشد. متغیرها با یک مقدار در مرز دامنه مشخص می‌شوند. این حالت برای شرایط مرزی ورودی با سرعت متوسط در سراسر منطقه ورودی جریان و مرزهای دیوار با شرایط بدون-لغزش (no-slip) استفاده می‌شود.

۲-۴- شرایط مرزی خروجی (نیومن)

شرط نیومن یک مشتق از حل در مرز دامنه محاسباتی است. این حالت در سطح خروجی با شیب صفر استفاده می‌شود، که برای مدل عددی مخازن تماسی (CTS) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش‌های خروجی رویکرد نیومن برای همه متغیرها اعمال شد؛ به‌طوری‌که گرادیان مربوطه به مرز صفر تنظیم شد. ترکیبی از شرایط نیومن و دیریکله برای متغیرها بسته به شرایط مرزی اعمال می‌شود. در ورودی یک شرایط دیریکله برای مؤلفه‌های سرعت تنظیم شده است. جایی که سرعت افقی یکنواخت وابسته به نرخ جریان Q به‌طوری‌که $U_{in} = Q/A_{in}$ است که U_{in} مؤلفه سرعت افقی ورودی است و A_{in} ناحیه‌ای است که توسط سطح ورودی پوشش داده شده است. از سوی دیگر مؤلفه‌های سرعت عرضی (V) و سرعت عمودی (W) ناچیز و برابر صفر در نظر گرفته شده است. برای فشار P شرایط نیومن گرادیان-صفر در نظر گرفته شد. درحالی‌که پارامترهای آشفتگی (k, ε) بر اساس U_{in} برآورد شد. برای



شکل ۴- هندسه شبکه تولیدشده مخزن تماسی CT-1

میدان جریان با استفاده از مدل استاندارد $k-\varepsilon$ به‌دست آمد. اما الگوی جریان و سرعت نمی‌تواند در مورد مسائل مربوط به کیفیت آب بینشی ارائه دهد؛ مگر این‌که یک مطالعه ردیابی انجام شود. منحنی‌های توزیع زمان ماند (RTD) برای هر حالت به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد آن‌ها استخراج شده است. درواقع منحنی‌های RTD توصیفی از زمان است که عناصر مختلف مایع در داخل مخزن صرف می‌کنند و بنابراین برای شناسایی ویژگی‌های مخزن تحت شرایط پایدار و زمان متغیر استفاده می‌شود (Gualtieri, ۲۰۰۷).

۲-۲- مدل‌سازی آشفتگی ($k-\varepsilon$)

ویسکوزیته^{۱۵} گردابی (ویسکوزیته آشفتگی) یکی از پارامترهایی است که به‌طور گسترده در مدل‌های آشفتگی RANS استفاده شده است. برخلاف ویسکوزیته سینماتیک^{۱۶} مولکولی (V)، ویسکوزیته گردابی یک خاصیت سیال نیست؛ اما به‌طور مستقیم باحالت وضعی آشفتگی مرتبط است و در امتداد میدان جریان متغیر است. ویسکوزیته گردابی با توجه به رابطه (۱) می‌تواند محاسبه شود:

$$\nu_t = C_{\mu} \frac{k}{\varepsilon} \quad (۱)$$

که در آن C_{μ} یک ثابت و ε نرخ آشفتگی انرژی جنبشی متلاطم است. پارامتر P_k که تولید k را تعریف می‌کند، به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$P_k = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (۲)$$

سپس k و ε توسط معادلات دیفرانسیل (۳) و (۴) مدل‌سازی می‌شوند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{6k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (۳)$$

17. Dirichlet
18. Neumann

15. Viscosity
16. Kinematic

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)d(t)} \quad (9)$$

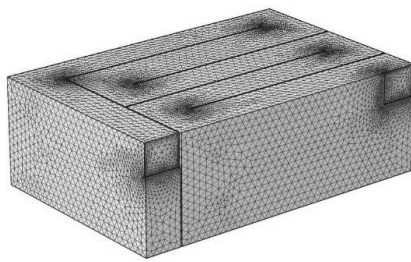
که در آن، $C(t)$ مقدار غلظت ردیاب در خروجی مخزن و $E(t)$ تابعی است، که مدت زمان‌های متفاوت حضور سیال در مخزن را به صورت کمی بیان می‌کند (امینی و تقی‌پور، ۱۳۸۹). محاسبه غلظت به صورت پله‌ای در خروجی از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$F(t) = \frac{C(t)}{\sum_{i=1}^n C_0} \quad (10)$$

که در آن C_0 مقدار غلظت اولیه ماده ردیاب در لحظه تزریق به ورودی مخزن می‌باشد و $F(t)$ تابع توزیع تجمعی را نشان می‌دهد. معمولاً یک زمان بی‌بعد (θ) که نسبت بین زمان t و زمان تئوری ماند TDT است (رابطه (۱۱))، برای محاسبه شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی و مقایسه آن‌ها استفاده می‌شود (امینی و تقی-پور، ۱۳۸۹).

$$\theta = \frac{t}{T} \quad (11)$$

در ادامه شبیه‌سازی آرایش جدید بافل‌ها در مخزن MS4-C انجام شد. ورودی و خروجی این مخزن کانال به ارتفاع ۰/۳ و عرض ۰/۳۶۵ متر می‌باشد. در این حالت تعداد دیواره‌ها ۵ عدد و نحوه قرارگیری آن‌ها با مخزن CT-1 متفاوت است. TDT زمان تئوری ماند ۱۲۶۹/۰۶۷ ثانیه و سرعت در ورودی برابر ۰/۰۴۳۷ متر بر ثانیه می‌باشد. شکل (۵) ویژگی هندسی و شبکه تولیدشده مخزن را نشان می‌دهد.



شکل ۵- شبکه تولیدشده مخزن MS4-C

هم‌چنین در این پژوهش تعداد بافل‌های مختلف در مخزن CT-1 شبیه‌سازی شد. تمامی حالات بررسی شده در این قسمت حاصل تغییر در تعداد دیواره‌های مخزن CT-1 می‌باشد. در واقع علاوه بر حالت ۷ بافلی یا همان مخزن CT1-C، مخزن با همان ابعاد اولیه در ۵ حالت ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۱ بافل شبیه‌سازی شد. در این حالت اثر کاهش و افزایش بافل‌ها بر عملکرد هیدرولیکی مخزن مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۶) به ترتیب هندسه شبکه تولیدشده از پنج حالت مخزن با تعداد بافل‌های مختلف را نشان

مرزهای جامد شرایط نیومن برای P و ε اعمال شد. درحالی‌که متغیرهای باقی‌مانده صفر تنظیم شد ($U=V=W=K=0$).

۲-۵- شرایط سطح آزاد

سطح آزاد به عنوان یک درب پوش صلب و بدون اصطکاک مدل‌سازی شد. به طوری که سرعت عمودی در سطح صفر تنظیم شد. (شرایط دیریکله) درحالی‌که شرایط مرزی نیومن برای دیگر متغیرهای هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، در سطح آزاد این متغیرها بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=H} = \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{z=H} = \left. \frac{\partial k}{\partial z} \right|_{z=H} = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, w = 0 \quad (6)$$

که در آن H عمق جریان است. این رویکرد به عنوان تغییرات در سطح آب در مدل آزمایشگاهی در طی آزمایش در که در همه هندسه ناچیز بود، زمانی که حالت‌های پایدار به دست آمد، در نظر گرفته شد.

۲-۶- شبیه‌سازی انتقال ردیاب

شبیه‌سازی انتقال ردیاب توسط معادله پخش‌شدگی-فرافرت انجام شده است. رابطه (۷):

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} + U_j \frac{\partial C_T}{\partial x_j} = D_T \frac{\partial^2 C_T}{\partial x_j^2} \quad (7)$$

شبیه‌سازی مدل مخزن CT-1 در طی سه مرحله انجام می‌شود. مرحله اول شبیه‌سازی میدان سرعت حالت پایدار متلاطم زمان شبیه‌سازی برای این حالت ۳ ساعت و ۲۵ دقیقه و ۵۹ ثانیه می‌باشد. مرحله دوم و سوم شبیه‌سازی میدان غلظت با توجه به انتشار لحظه‌ای ردیاب در شرایط متغیر ناپایدار برای محاسبه زمان ماند به صورت پالس^{۱۹} و به صورت پله‌ای با مدت زمان ۴ ساعت و ۴۸ دقیقه و ۳۴ ثانیه برای حالت پالس و مدت زمان ۳ ساعت و ۴۵ دقیقه و ۱۹ ثانیه برای حالت پله‌ای در سیستم با پردازنده ۳ گیگا هرتز و حافظه ۸ گیگابایت می‌باشد. معادله سرعت واکنش با استفاده از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial Cl}{\partial x} = -k \cdot Cl \quad (8)$$

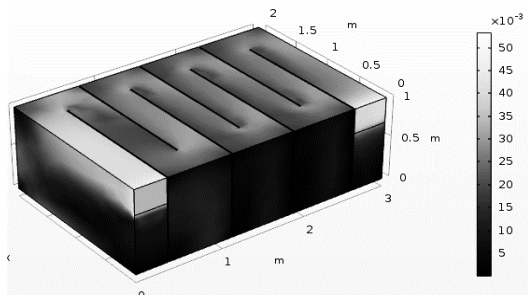
که در آن، Cl غلظت کلر، k نرخ فروپاشی (decay rate) مواد ضدعفونی‌کننده که به طور کلی وابسته به کیفیت آب و هم‌چنین شرایط مواد ضدعفونی‌کننده است. در این مطالعه غلظت کلر در ورودی برابر ۱/۲mg/l و مقدار k استفاده شده در این مطالعه برابر $1 \cdot 10^{-4} \text{S}^{-1}$ می‌باشد (Angeloudis و همکاران، ۲۰۱۴). محاسبه غلظت به صورت پالس در خروجی از رابطه (۹) به دست می‌آید:

جدول ۲- تعداد سلول‌های شبکه حالات شبیه‌سازی شده

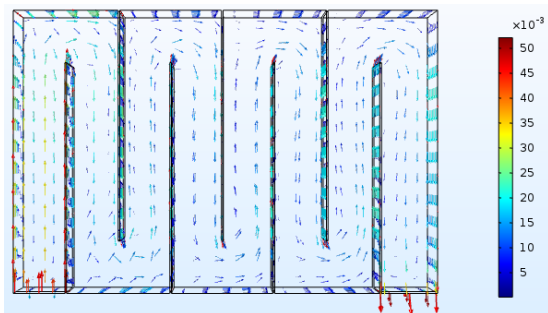
نوع مخزن	المان‌های دامنه	المان‌های مرزی	المان‌های لبه
CT-1	۷۲۲۲۷۴	۴۳۴۳۹	۲۳۹۳
MS4-C	۵۸۸۱۴۷	۳۹۶۷۷	۲۱۵۴
۱	۱۶۴۸۷۲	۱۳۹۱۰	۶۴۳
۳	۳۸۳۲۶۴	۲۳۸۲۸	۱۲۲۲
۵	۵۲۵۴۰۹	۳۲۸۳۶	۱۷۷۶
۹	۸۱۰۷۴۸	۵۱۹۳۶	۳۰۲۸
۱۱	۹۳۴۱۹۷	۶۱۴۲۷	۳۶۷۶

۳- نتایج و بحث

شکل (۷) پروفیل سرعت و شکل (۸) بردارهای سرعت در مخزن CT-1 را نشان می‌دهد.



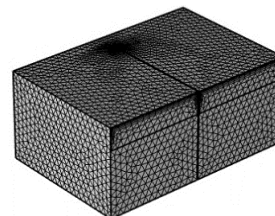
شکل ۷- پروفیل توزیع سرعت در مخزن CT-1 با مقدار سرعت در ورودی ۰/۰۴۳۱۰ متر بر ثانیه



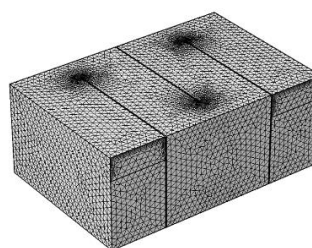
شکل ۸- بردار سرعت در مخزن CT-1-C

همان‌طور که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود؛ سرعت در ورودی مخزن زیاد است پس از ورود به مخزن رفته‌رفته کاهش می‌یابد. هرچقدر از ورودی مخزن دور شده سرعت جریان کاهش می‌یابد. در گوشه‌ها و نزدیک نوک بافل‌ها جریان‌های چرخشی و برگشتی سه‌بعدی قابل توجهی به‌ویژه در محفظه اول مشاهده می‌شود. که اهمیت مدل‌سازی سه‌بعدی را نشان می‌دهد و بیانگر این است که؛ مدل‌های دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان در این مخازن مناسب نیستند. بخش قابل توجهی از محفظه توسط جریان‌های چرخشی و معکوس اشغال شده، که بیشتر در محفظه اول و دوم مشاهده می‌شود. این جریان‌های چرخشی موجب ایجاد نواحی

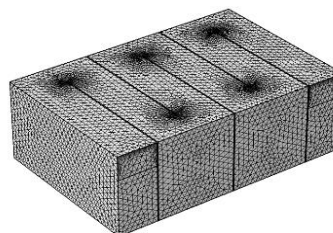
می‌دهد. جدول (۲) تعداد سلول‌های شبکه برای هر یک از حالات ذکر شده را نشان می‌دهد.



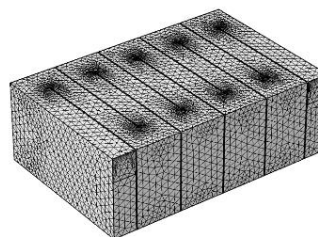
(الف)



(ب)

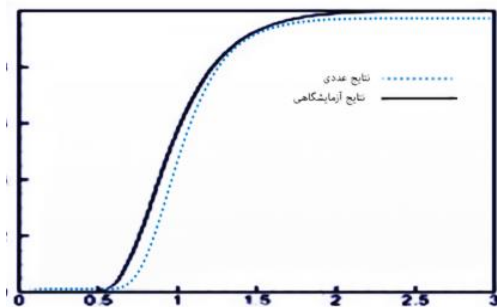


(ج)



(د)

شکل ۶- (الف) هندسه شبکه مخزن ۱ بافلی، (ب) هندسه شبکه مخزن ۳ بافلی، (ج) هندسه شبکه مخزن ۵ بافلی، (د) هندسه شبکه مخزن ۹ بافلی، (ه) هندسه شبکه مخزن ۱۱ بافلی



شکل ۱۰- مقایسه منحنی جریان FTC نتایج عددی حاصل از مدل شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی غلظت- پله‌ای در خروجی مخزن CT-1

هم‌چنین شاخص‌های کارایی هیدرولیکی با توجه به نمودارهای RTD و FTC محاسبه شده است و نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مطابقت نسبتاً خوبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی در خروجی مخزن CT-1 وجود دارد.

۳-۲- شاخص‌های کارایی هیدرولیکی

در این بخش ابتدا معرفی شاخص‌های کارایی هیدرولیکی^{۲۰} مخازن تماسی پرداخته می‌شود؛ سپس به مقایسه و اعتبار سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام می‌شود.

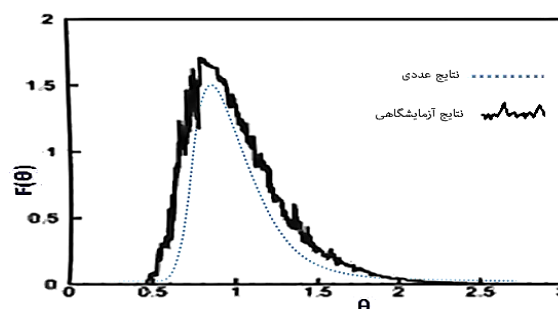
شاخص‌های عملکرد ضدعفونی هیدرولیکی اگرچه روی بهره‌وری هیدرولیکی تمرکز می‌کنند، اما آن‌ها هم‌چنین کیفیت آب مورد انتظار را نشان می‌دهند. این شاخص‌ها عبارت‌اند از θ_{10} و θ_{90} که عبارت‌اند از مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا ۱۰ و ۹۰ درصد از ماده ردیاب به خروجی مخزن برسد، فاکتور بافل (BF)^{۲۱}، شاخص موریل (MI)^{۲۲} (Taylor و همکاران، ۲۰۱۵).

شاخص BF به‌عنوان نسبت T_{10} به TDT (زمان تئوری ماند) تعریف شده و از آنجایی که مدار کوتاه (اگر سرعت ذرات در مخزن تماسی زیاد باشد و به‌اندازه کافی با کلر در تماس نباشد، به‌گونه‌ای که ضدعفونی به‌خوبی صورت نگیرد؛ به این پدیده مدار کوتاه گفته می‌شود) در مخزن را نشان می‌دهد، شاخصی است که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخازن بدون بافل معمولاً مقدار BF، ۰/۱ دارند؛ درحالی‌که مخازن با جریان ایده‌آل پلاگ مقدار BF، ۱/۰ را دارند. MI یک شاخص اختلاط است که مقدار انتشار (پخش) در یک مخزن را ارزیابی می‌کند. راه معقول برای بهینه کردن بهره‌وری ضدعفونی هیدرولیکی برای مخازن تماسی افزایش مقدار T_{10} و درعین‌حال به حداقل رساندن مقدار T_{90} می‌باشد، که می‌توان با کاهش مدار کوتاه و توسعه جریان از طریق استفاده از بافل‌ها

مرده و دور شدن جریان از شرایط جریان یکنواخت پلاگ می‌شود و بر کارایی هیدرولیکی مخزن تماسی تأثیر منفی می‌گذارد. اما با دور شدن جریان از مارپیچ اول و نزدیک شدن به بافل بعدی ملاحظه می‌شود جریان‌های معکوس و چرخشی نسبت به محفظه اول کم‌تر شده و از محفظه سوم به بعد الگوی جریان نسبتاً یکنواخت شده است و جریان در مسیر مارپیچی به‌همین روند ادامه دارد. سرعت‌های بالاتر در بخش خروجی مخزن تماسی مشاهده می‌شود. در واقع بافل‌ها در مخازن تماسی برای به حداقل رساندن جریان‌های چرخشی و معکوس و در نتیجه کاهش مناطق مرده، ایجاد یک مسیر تماس طولانی‌تر و کاهش جدایی و انحراف جریان داخل مخزن قرار داده شده است؛ که منجر به نزدیک شدن شرایط جریان به جریان ایده‌آل پلاگ می‌گردد.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی غلظت در مخزن CT-1

شکل‌های (۹) و (۱۰) مقایسه بین نمودار توزیع زمان ماند RTD و منحنی جریان FTC در خروجی مخزن تماسی می‌باشد. به مدت زمان سپری‌شده توسط اتم‌ها در داخل مخازن، زمان ماند گفته می‌شود. در جریان ایده‌آل پلاگ کلیه اتم‌های مواد زمان ماند یکسانی دارند، یعنی باهم وارد می‌شوند و زمان مشخصی داخل مخزن هستند و باهم از مخزن خارج می‌شوند. اما در واقعیت به این شکل نیست، در مخازن حقیقی اتم‌ها و مولکول‌ها زمان ماند متفاوتی درون مخزن دارند بعضی از آن‌ها به‌محض وارد شدن از مخزن خارج می‌شوند، بعضی از آن‌ها با یک فاصله زمانی بیشتر و بعضی هم با فاصله زمانی خیلی بیشتر نسبت به اتم‌های اولیه خارج می‌شوند. بنابراین یک زمان ماند وجود ندارد و توزیع زمان ماند به-وجود می‌آید.



شکل ۹- مقایسه منحنی نتایج عددی حاصل از مدل شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی پالس - غلظت RTD در خروجی مخزن CT-1

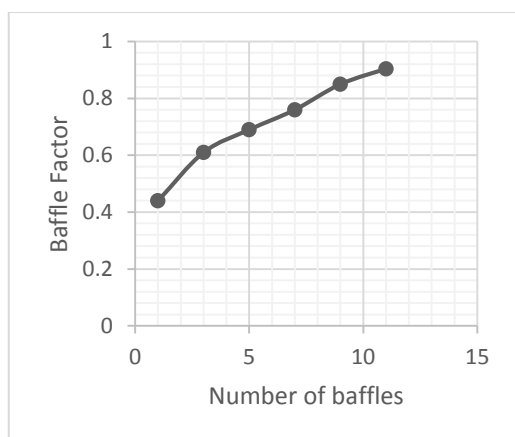
پس از آن برای بررسی تأثیر پیکربندی بافل‌های بر روی هیدرودینامیک و انتقال محلول شبیه‌سازی آرایش جدیدی از بافل‌ها در مخزن MS4-C انجام شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود؛ باتوجه به جدول (۴) فاکتور t_{10}/T از ۰/۷۱ به ۰/۸۶ و شاخص موریل از ۱/۷۱ به ۱/۵۱۱ برای مخزن MS4-C نسبت به مخزن CT-1 به ترتیب روند افزایش و کاهش داشته است که؛ این روند به معنای بهبود در بهره‌وری هیدرولیکی می‌باشد.

در بخش قبل ذکر شد، به منظور بررسی اثر تعداد بافل‌ها بر روی کارایی مخزن، هندسه مخزن تماسی CT-1 در پنج حالت ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۱ بافلی شبیه‌سازی شد. جدول (۵) شاخص‌های کارایی هیدرولیکی محاسبه‌شده از شبیه‌سازی تعداد بافل‌های مختلف را بیان می‌کند.

جدول ۵- تحلیل نتایج شاخص‌های کارایی هیدرولیکی

TDT (s)	V_{in} (m/s)	MI	t_{90}/T	t_{10}/T	تعداد بافل
۱۲۸۳/۸۹	۰/۰۲۱۲۳	۳/۶۷	۲/۲۴۰	۰/۶۱	۳
۱۲۷۵/۴۲	۰/۰۳۱۷۹	۲/۸۱	۱/۹۴	۰/۶۹	۵
۱۲۶۵	۰/۰۴۳۱	۱/۷۱	۱/۳	۰/۷۱	۷
۱۲۵۸/۴۷	۰/۰۵۳۲۲	۱/۴۳	۱/۲۱۷	۰/۸۵	۹
۱۲۴۹/۷۸	۰/۰۶۴۰۳	۱/۳۳	۱/۲۰۶	۰/۹۰۴	۱۱

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد بافل‌ها در یک هندسه ثابت مخزن تماسی سرعت ورودی افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد بافل‌ها شاخص t_{10}/T (فاکتور بافل) افزایش و شاخص موریل کاهش یافته است. به عبارت دیگر افزایش تعداد بافل‌ها تأثیر مثبت بر روی کارایی هیدرولیکی مخزن تماسی داشته است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب روند افزایشی و کاهشی فاکتور بافل و شاخص موریل در برابر افزایش تعداد بافل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- نمودار تغییر فاکتور بافل در برابر تغییر تعداد بافل‌ها

(دیواره‌های داخلی) انجام شود. بافل‌های قرار داده شده در داخل مخازن تماسی برای یک مسیر تماس طولانی‌تر و کاهش جدایی جریان داخل یک مخزن، که هر دو ممکن است در تئوری گسترش زمان تماس ضد عفونی و منجر به نزدیک شدن شرایط جریان پلاگ گردد (Taylor و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول (۳) کد عملکرد هیدرولیکی چهارگانه را برای شاخص‌های ذکر شده نشان می‌دهد، باتوجه به جدول می‌توان کارایی نهایی مخزن تماسی را تعیین نمود (Gualtieri, ۲۰۰۶).

جدول ۳- کد عملکرد هیدرولیکی چهارگانه

کارایی (بهره‌وری)	θ_{10}	θ_{90}	MI
ضعیف	< ۰/۲	> ۲/۳	> ۱۰
حد وسط	۰/۲-۰/۴	۲/۰-۲/۳	۵
قابل قبول	۰/۴-۰/۵	۱/۵-۲/۰	۲/۵-۵/۰
عالی	> ۰/۵	< ۱/۵	< ۲/۵

جدول (۴) شاخص‌های کارایی هیدرولیکی محاسبه‌شده برای مخزن تماسی CT-1 با استفاده از نمودارهای توزیع زمان ماند و منحنی جریان در خروجی مخزن تماسی، را نشان می‌دهد. این شاخص‌ها عبارتند از: t_{90}/T ، t_{10}/T و MI که در دو حالت EXP (مطالعه آزمایشگاهی)، Comsol (شبیه‌سازی عددی انجام شده در این پژوهش با روش المان محدود) مقایسه شده است. نتایج ردیف یک مربوط به نتایج آزمایشگاهی و ردیف دو نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول می‌باشد. تمامی شاخص‌های محاسبه‌شده با توجه به نمودار شکل (۹) و (۱۰) می‌باشد.

جدول ۴- نتایج شاخص‌های کارایی هیدرولیکی مخازن

MS4-C و CT-1			
MI	t_{90}/T	t_{10}/T	مخزن CT-1
۲/۱۲	۱/۴۸	۰/۷۰	EXP
۱/۷۱	۱/۳	۰/۷۱	Comsol
MI	t_{90}/T	t_{10}/T	مخزن MS4-C
۱/۶۹	۱/۳۲	۰/۷۸	EXP
۱/۵۱۱	۱/۳۰۱	۰/۸۶	Comsol

شبیه‌سازی اولیه برای تولید مدل آزمایشگاهی انجام شده باتوجه به اعتبارسنجی بین نتایج عددی با داده‌های تجربی مخزن CT-1 نشان داد که؛ توانایی پیش‌بینی مدل عددی رضایت‌بخش بود تفاوت بین دو مدل عددی و آزمایشگاهی می‌تواند به دلیل مدل نکردن دقیق کانال ورودی در مدل عددی باشد؛ همچنین سطح آب در شبیه‌سازی افقی در نظر گرفته شده و به عنوان درب پوش صلب مدل‌سازی شده است، در صورتی که در واقعیت بین سطح آب ورودی و خروجی مقداری تفاوت وجود دارد.

بافل‌ها در محدوده بین ۹ تا ۱۱ بافل می‌باشد و فراتر از این مقدار تأثیر منفی دارد و مخزن کارایی کمی خواهد داشت.

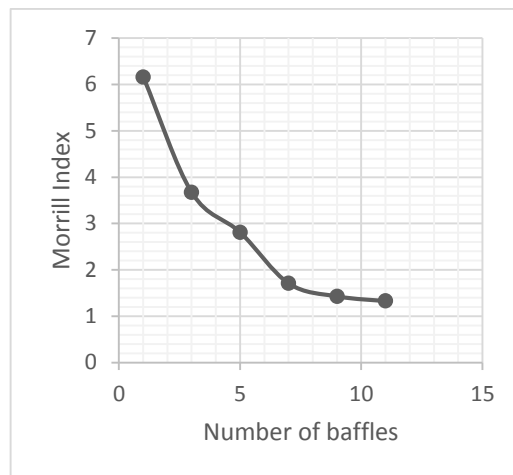
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی مخازن تماسی ضد عفونی کلر با استفاده از نرم‌افزار کامسول و فرآیندهای تصفیه و عملکرد مخازن پرداخته شده است. با استفاده از شاخص‌های کارایی هیدرولیکی عملکرد مخزن تعیین شد. بهترین کارایی مربوط به زمانی است که مقدار شاخص فاکتور بافل (t_{10}/T) حداکثر و به یک نزدیک و شاخص موریل (t_{90}/t_{10}) حداقل باشد. زمانی که شبیه‌سازی اولیه برای تولید مدل آزمایشگاهی انجام شد با توجه به اعتبارسنجی بین نتایج عددی با داده‌های تجربی مخزن توانایی پیش‌بینی مدل عددی رضایت‌بخش تأیید شد. سپس شبیه‌سازی‌های بیشتر برای بررسی تأثیر تعداد بافل‌ها بر روی عملکرد هیدرولیکی مخازن تماسی انجام شد. به‌طور کلی اثر پیکربندی و آرایش بافل‌ها تأثیر زیادی بر روی هیدرودینامیک و کارایی مخزن تماسی داشته است؛ نتایج نشان داد که مخزن MS4-C با آرایش جدید از بافل‌ها تأثیر مثبتی بر کارایی هیدرولیکی داشته است.

از شبیه‌سازی اثر تعداد بافل‌ها بر روی کارایی مخزن تماسی CT-1 نتیجه شد؛ با افزایش تعداد بافل‌ها شرایط جریان به جریان پلاگ نزدیک‌تر می‌گردد و کارایی هیدرولیکی افزایش می‌یابد. اما این روند مثبت افزایش بافل‌ها بر روی بهره‌وری هیدرولیکی در محدوده ۹ تا ۱۱ بافل می‌باشد و از بررسی تعداد بافل بیشتر، مخزن با ۱۳ بافل نتیجه شد که تأثیر منفی بر کارایی مخزن داشته است.

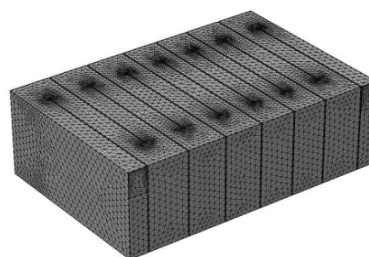
۵- علائم

A_{in}	سطح مقطع ورودی
BF	فاکتور بافل
$CCTs$	مخازن تماسی کلر
CT	مخزن تماسی
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
FTC	منحنی جریان
H_t	ارتفاع سطح آب
K	انرژی جنبشی
K	نرخ فروپاشی ماده ضد عفونی کننده (در این مطالعه برابر $10^{-4} \times 2/77$ می‌باشد)
L_{bo}	طول دهانه بافل
L_b	طول بافل
L_T	طول مخزن
MI	اندیس موریل
N_b	تعداد بافل‌ها



شکل ۱۲- نمودار تغییر شاخص موریل در برابر تغییر تعداد بافل‌ها

نتایج نشان می‌دهد که، افزایش تعداد بافل‌ها موجب بهبود در کارایی هیدرولیکی مخزن تماسی می‌گردد. اما این افزایش بافل‌ها تا چه محدوده‌ای بر کارایی هیدرولیکی تأثیر مثبت خواهد داشت؟ به همین دلیل به شبیه‌سازی مخزن CT-1 در حالت ۱۳ بافلی پرداخته شد. شکل (۱۳) هندسه شبکه ایجاد شده و جدول (۶) شاخص‌های کارایی هیدرولیکی محاسبه شده برای مخزن ۱۳ بافلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- هندسه شبکه مخزن ۱۳ بافلی

جدول ۶- محاسبه شاخص‌های کارایی هیدرولیکی مخزن ۱۳ بافلی

تعداد بافل	t_{10}/T	t_{90}/T	MI	$V_{in}(m/s)$	TDT(s)
۱۳	۰/۸۴۹	۱/۲۳۹	۱/۳۸	۰/۰۷۴۹	۱۲۴۱/۵۲

همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ با افزایش تعداد بافل‌ها از ۱۱ به ۱۳ تا مقدار t_{10}/T (فاکتور بافل) از ۰/۹۰۴ به ۰/۸۹۴ کاهش و شاخص موریل (MI) از ۱/۳۳ به ۱/۳۸ افزایش پیدا کرده است؛ که این تأثیر منفی بر روند کارایی مخزن داشته است. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت مزایای حاصل از اضافه کردن تعداد

Q	دبی، m^3/s (در این مطالعه برابر $0.00472 m^3/s$ می-باشد)
$RANS$	معادلات میانگین رینولدز- ناویر استوکس
RTD	توزیع زمان ماند
Re	عدد رینولدز (در این مطالعه برابر 6750 می-باشد)
TDT	زمان تئوری ماند، (در این مطالعه برابر 1265 ثانیه می-باشد)
T_{10}	مدت زمانی که طول می کشد تا 10 درصد ماده ردیاب به خروجی مخزن برسد
T_{90}	مدت زمانی که طول می کشد تا 90 درصد ماده ردیاب به خروجی مخزن برسد
U_{in}	سرعت ورودی، m/s
U_b	سرعت حجمی، mm/s (در این مطالعه برابر $12.5 mm/s$ می-باشد)
W_{inlet}	عرض ورودی، m
ϵ	نرخ پراکندگی انرژی جنبشی
ν_t	ویسکوزیته گردابی

۶- مراجع

- امینی ر، تقی پور ر، " بررسی تعداد دیواره‌های داخلی در کارایی تانک‌های تماسی ضد عفونی کلرین با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی"، چهارمین همایش تخصصی محیط زیست تهران، ۱۳۸۹.
- Angeloudis A, "Numerical and experimental modelling of flow and kinetic process in serpentine disinfection tanks", Phd Thesis, Cardiff University, Uk, 2014.
- Angeloudis A, Stoesser T, Falconer AR, Kim, "Flow, transport and disinfection performance in small- and full-scale contact tanks", Journal of Hydro-environment Research, 9 (2015), 15-27, 2014.
- Gualtieri, C, "Numerical simulation of flow and tracer transport in a disinfection contact tank", 3rd International Congress on Environmental Modelling and Software- Burlington, Vermont, USA, 235, 2006.
- Gualtieri C, "Residence time distribution and dispersion in a contact tank", Hydraulic and Environmental Engineering Dept, Ippolito, University of Napoli Federico II, Via Claudio, Napoli, Italy, 21- 80125, 2007.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Residence_time.
- Neil S, Trevor H, "White's Handbook of chlorination and Alternative Disinfections", Phd, P.E. Iowa state university, Fifth Edition, 2010.
- Rauen BW, Angeloudis A, Falconer AR, "Appraisal of chlorine contact tank modelling practices", Water Research, 2012, 46 (18), 5834-5847.
- Taylor HZ, Carlston SJ, Venayagamoorthy KS, "Hydraulic design of baffles in disinfection contact tanks", Journal of Hydraulic Research, 2015, 53, 400-407.

EXTENDED ABSTRACT

Simulate the Effect of Configuration and Number of Baffles in the Hydraulic Efficiency of Chlorine Contact Tanks

Mahdi Asadi Aghbalaghi *, Mahsa Esmaeili, Rohollah Fatahi

Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, shahrekord 03832324428, Iran

Received: 12 November 2020; Accepted: 16 February 2021

Keywords:

Chlorine, Contact tanks, Baffles, Configuration, Hydraulic performance.

1. Introduction

Chlorine contact tanks are commonly used to disinfect drinking water before distribution. These tanks are usually open compartments that are divided by a series of baffles. The separation of the compartments helps to control the flow of water through the tanks and improves the process of disinfection of the chlorine. The main purpose of chlorine contact tanks provides a suitable residence time for both micro-organisms and disinfectants to achieve the desired degree of inactive germs (Angeloudis, 2014).

In this study, the simulation of the 3D model of the CT-1 contact memory model using the Comsol Multiphysics 5.3a software is presented. The experimental model of this tank is located at the Hyder Lab of the Water and Environmental Research Center at Cardiff University of England (Fig. 1) (Angeloudis, 2014).

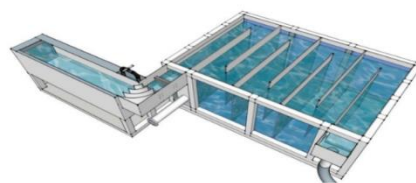


Fig. 1. Geometric contact tank model CT-1

In this study, the three-dimensional simulation of the CT-1 contact tank model is performed using Comsol Multiphysics 5.3a software. The experimental model of this reservoir is located in the Hyder Laboratory of the Center for Water and Environmental Research at Cardiff University, England. Also, a three-dimensional simulation of the new arrangement of baffles in the MS4-C tank and the effect of the number of baffles in 5 modes of 1, 3, 5, 9 and 11 was performed on the hydraulic efficiency of the tank. The residence time distribution curve (RTD) and flow curve (FTC) were extracted for each case to evaluate and compare their performance.

2. Methodology

In this simulation, the geometry is plotted in the Comsol software environment. The tank with dimensions of $3 \times 2 \times 1.2$ meters has 7 baffles with dimensions of $1.2 \times 1.63 \times 0.012$ m and the walls are spaced at the same distance of 0.365 meters. Also, the channel entrance level is 0.365×0.3 m and the water depth is 1.02.

* Corresponding Author

E-mail addresses: mahdi.asadi.a@gmail.com (Mahdi Asadi Aghbalaghi), mahsa_esmaeili72@yahoo.com (Mahsa Esmaeili), fatahi2@gmail.com (Rohollah Fatahi).

The produced mesh in this simulation has been Coarse. Simulation of the CT-1 tank model has performed over three stages. First, the steady-state simulation of the turbulent velocity field is performed, the simulation time for this stage 3 hours 25 minutes and 59 seconds. In the second and third stages, the concentration field is simulated with respect to the immediate release of tracer in unsteady state conditions for calculating the residence time in the form of pulses and steps release. Simulation time is 4 hours and 48 minutes and 34 seconds for a pulse release, and is 3 hours 45 minutes and 19 seconds for the system CPU 3 GHz and 8 GB of memory respectively.

The reaction speed equation is obtained by using equation 1:

$$\frac{\partial Cl}{\partial x} = -k \cdot Cl \tag{1}$$

Where Cl is the concentration of chlorine, k is the decay rate of disinfectants that is generally dependent on the quality of water and also the conditions of disinfection. In this study, the concentration of chlorine at the inlet and equal to 1.2 mg/l and the amount of k used is equal to $2.77 \cdot 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ (Angeloudis et al., 2014).

The calculation of the concentration in the pulse is obtained by equation 2:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)d(t)} \tag{2}$$

Where $C(t)$ is the concentration of the tracer at the outlet of the tank and $E(t)$ is a function, which represents a different time of the presence of fluid in the tank (Amini and Taghipour, 1388).

The calculation of the concentration in the output from Equation 3:

$$F(t) = \frac{C(t)}{\sum_{i=1}^n C_0} \tag{3}$$

Where C_0 is the initial concentration of the tracer at the injection moment to the tank input, and $F(t)$ indicates the cumulative distribution function.

Usually, a dimensionless time (θ) is defined which is the ratio between time t and time T , theoretically restraint. Equation 4 is used to calculate hydraulic performance indicators and compare them (Amini and Taghipour, 1388).

$$\theta = \frac{t}{T} \tag{4}$$

3. Results and discussion

Table 1 shows the calculated hydraulic performance indicators for the CT-1 and MS4-C contact tanks using distribution curves of the residence time and the flow curve in the output of the contact tank. These indices are t_{10}/T , t_{90}/T , and MI , which are compared in two EXP (experimental study), Comsol (numerical simulation performed in this study by finite element method).

Table 1. Results of hydraulic performance indicators for CT-1 and MS4-C contact tanks

CT-1 Tank	t_{10}/T	t_{90}/T	MI
EXP	0.70	1.48	2.12
Comsol	0.76	1.3	1.71
MS4-C Tank	t_{10}/T	t_{90}/T	MI
EXP	0.78	1.32	1.69
Comsol	0.86	1.301	1.511

Table 2. Analysis of the results of hydraulic efficiency indicators

number of baffles	t_{10}/T	t_{90}/T	MI	$V_{in}(m/s)$	TDT(s)
3	0.61	2.240	3.67	0.02123	1283.89
5	0.69	1.94	2.81	0.03179	1275.42
7	0.76	1.3	1.71	0.0431	1265
9	0.85	1.217	1.43	0.05322	1258.47
11	0.904	1.206	1.33	0.06403	1249.78

Also, in order to investigate the effect of the number of baffles on tank performance, the geometry of the CT-1 contact tank was simulated in five modes: 1, 3, 5, 9 and 11 baffles. Table 2 describes the hydraulic performance indicators calculated from simulating the number of different baffles.

As can be seen, increasing the number of baffles in a fixed geometry of the contact tank increases the input speed. As the number of baffles increases, the t_{10}/T index (baffle factor) increases and the Morrill index decreases. In other words, increasing the number of baffles has had a positive effect on the hydraulic efficiency of the contact tank. The simulation of the 13-baffles tank concluded that by increasing the number of baffles from 11 to 13 the value of t_{10}/T (baffle factor) decreased from 0.904 to 0.894 and the Morrill (MI) index from 1.33 to 1.38 has increased; as a result, it has a negative effect on the efficiency of the tank. Therefore, in general, it can be said that the benefits of adding the number of baffles are in the range of 9 to 11 and beyond this amount, it has a negative effect and the tank will have little efficiency.

4. Conclusions

In this study, the numerical simulation of chlorine disinfection contact tanks using Comsol software and the processes of purification and performance of tanks have been studied. The performance of the tank was determined using hydraulic performance indicators. Using the hydraulic performance indicators, the performance of the tank is determined. The best performance is when the amount of Baffle Factor (t_{10}/T) is maximum and the Morrill index (MI) is minimum. The initial simulation results showed that numerical results have good agreement with laboratory model results. Further simulations were then performed to investigate the effect of the number of baffles on the hydraulic performance of the contact tanks. In general, the configuration and arrangement of the baffles had a great impact on the hydrodynamics and efficiency of the contact tank; it was observed that the MS4-C tank with the new arrangement of the baffles had a positive effect on the hydraulic efficiency. The simulation of the effect of the number of baffles on the efficiency of the tank was concluded; with the increase in the number of baffles, the flow conditions become closer to the plug flow and the hydraulic efficiency increases. However, this positive trend is an increase in baffles on hydraulic efficiency in the range of 9 to 11 baffles, and a study of more baffles resulted in a tank with 13 baffles, which had a negative impact on the hydraulic efficiency of the tank.

5. References

- Angeloudis A, "Numerical and experimental modelling of flow and kinetic process in serpentine disinfection tanks", Phd Thesis, Cardiff University, Uk, 2014.
 - Angeloudis A, Stoesser T, Falconer AR, Kim D, "Flow, transport and disinfection performance in small-and full-scale contact tanks", *Journal of Hydro-Environment Research*, 2014, 9, 15-27.
 - Amini R, Taghipour R, "Three-dimensional modeling of flow in chlorine disinfection contact tanks", in: *Third International Conference on Environmental Engineering*, University of Tehran, 1388.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Residence_time.