

بررسی عددی اثر ابعاد حوضچه رسوب‌گیر شهری بر روی راندمان رسوب‌گیری

فرهاد گلریز^{۱*} و سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

چکیده

در این مقاله اثر تغییرات طول، عرض و ارتفاع حوضچه روی راندمان حوضچه‌های رسوب‌گیر شهری مستطیلی بررسی شده است. برای تعیین ابعاد اولیه حوضچه، از حوضچه‌های رسوب‌گیر شهری تهران به‌عنوان الگو استفاده شده است. بر همین اساس سیزده حوضچه با ابعاد مختلف و با حجم یکسان با مدل عددی فلوئنت شبیه‌سازی شدند. برای حل میدان‌های سرعت و غلظت در حوضچه از یک مدل دو فاز پیچیده و دقیق به شکل اولری-اولری و کوپل شده با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شد و سپس راندمان حوضچه‌ها محاسبه شده است. بر همین اساس، نمودار تغییرات زمانی راندمان حوضچه، برای حوضچه‌های با طول، عرض و ارتفاع گوناگون به دست آمد. نتایج حاصل از این نمودارها نشان داد که به‌دلیل درشت دانه بودن ذرات و همچنین شکل هندسی خاص حوضچه‌های شهری، عرض حوضچه تأثیر بیشتری در افزایش راندمان حوضچه داشته است.

واژه‌های کلیدی: شکل حوضچه، جریان دو فاز، حوضچه رسوب‌گیر شهری، راندمان ته‌نشینی، مدل اولرین.

ارجاع: گلریز ف. و صالحی نیشابوری س. ع. ا. ۱۳۹۴. بررسی عددی اثر ابعاد حوضچه رسوب‌گیر شهری بر روی راندمان رسوب‌گیری. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱-۱۰.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استاد گروه سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسئول: farhadgolriz@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۳۰

مقدمه

شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری مجموعه‌ای از سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای کنترل و انتقال رواناب ناشی از بارندگی در مناطق شهری به کار می‌روند. افزایش کیفیت رواناب ناشی از بارندگی از عوامل مهم در عملکرد صحیح شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری است. حوضچه‌های رسوب‌گیر شهری به‌عنوان یکی از اولین سازه‌های ورودی در مجموعه زهکشی شهری، وظیفه افزایش کیفیت رواناب حاصل از بارندگی، قبل از ورود رواناب به مجموعه زهکشی شهری را به عهده دارند.

شاید یکی از اولین کارهایی که برای تحلیل حوضچه رسوب‌گیر انجام شده است کار کلاسیک مربوط به هیزن (۱۹۰۴) باشد. هیزن از پژوهش‌هایش در مورد فرآیند رسوب‌گذاری در نهایت به این نتیجه رسید که ته‌نشینی ذرات بستگی به مساحت کف ناحیه‌ای دارد که برای ته‌نشینی در نظر گرفته شده است و به طور کامل مستقل از عمق حوضچه است. تاکستون و همکاران (۱۹۸۷) با استفاده از رنگ، اثر تغییرات راندمان را در ۱۲ استخر کم عمق به‌صورت تجربی آزمایش کردند. هدف از بررسی‌های آن‌ها، رسیدن به روشی برای پیش‌بینی راندمان هیدرولیکی براساس هندسه حوضچه، دبی و شرایط باد بود.

آدامز و رودی (۱۹۹۰) با مدل کردن جریان در حوضچه‌های تصفیه فاضلاب به این نتیجه رسیدند که اختلاف موجود بین نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی ناشی از در نظر نگرفتن انحنای جریان توسط مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد به کار رفته است. به طور عموم ایجاد جریان آرام در حوضچه‌ها تا حد زیادی به نسبت بالای طول به عرض حوضچه ارتباط پیدا می‌کند، با این وجود، رید و همکاران (۱۹۹۵) حداقل نسبت ۱۰:۱ را برای برقراری جریان پلاگ^۱ در حوضچه لازم دانستند.

پرسون (۲۰۰۰) در یکی از کامل‌ترین بررسی‌ها با استفاده از مدل مایک ۲۱^۲ به بررسی عددی دو بعدی اثر شکل حوضچه روی عملکرد هیدرولیکی، نواحی چرخشی و محل ورودی و خروجی پرداخت. نتایج حاصل از

شبیه‌سازی وی نشان داد که راندمان حوضچه با نسبت طول به عرض ۱:۱۲ از سایر حوضچه‌ها بیشتر است. خادمی (۱۳۸۴) افزایش راندمان حوضچه را با اضافه کردن تیغه هدایت کننده در ورودی جریان به حوضچه بدون تبدیل ناگهانی، بررسی کرد. نتایج وی نشان داد، زمانی که جت ورودی به حوضچه تغییرات شدید عرضی سرعت در آن به وجود نیارد، نصب تیغه هدایت کننده در عمق استغراق ۱۵٪، افزایش راندمان به میزان حداکثر ۸/۵٪ را نشان می‌دهد. ونگ و همکاران (۲۰۰۸) با نرم‌افزار استار-سی‌دی میدان جریان و غلظت در حوضچه‌های مستطیلی شکل ثانویه را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. انتقال مومنتم، نیروهای شناوری و اثرات جریان‌های چگال در مدل‌سازی آن‌ها در نظر گرفته شده است. در یک مورد به طور کامل کاربردی استامو (۲۰۰۸) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی و اصلاح حوضچه‌های ساخته شده در شهر آتن پرداخت. وی برای افزایش راندمان این حوضچه‌ها از دیوار هدایت کننده استفاده نمود. سامارایی و همکاران (۲۰۰۹) به‌صورت سه‌بعدی و با روش ال‌ای‌اس^۳ حوضچه‌های رسوب‌گیر را شبیه‌سازی کردند. ایشان برای شبیه‌سازی رسوبات از سیزده اندازه مختلف استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که حوضچه‌های طویل در رسوب‌گذاری ذرات درشت مؤثرتر از ذرات ریز عمل می‌کنند.

برای طراحی بهینه حوضچه‌های آبیاری، سجادی و شفاعی (۱۳۸۸) ده حوضچه را با طول، عرض و عمق‌های متفاوت به‌صورت سه‌بعدی با نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی کردند و با تکنیک روندیابی ذرات، ته‌نشینی ذرات را بررسی کردند. آدامسون و همکاران (۲۰۰۳) و دیفرسنی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که شرایط مرزی کف موجود در روش روندیابی ذرات در فلوئنت نتوانسته است به درستی توزیع ته‌نشینی رسوب در مدل آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند.

شاهرخی و همکاران (۲۰۱۳) به‌صورت آزمایشگاهی بهترین محل قرارگیری بافل را در حوضچه‌های اولیه مستطیلی بررسی کردند. اخیراً تارپاجکو و پانتوکراتوراس (۲۰۱۳) به‌صورت عددی اثر فاز رسوب روی میدان جریان را در حوضچه بررسی کردند. آن‌ها با در نظر

1- Plug Flow

2- Mike 21

فازه، لازم است تا مجموعه معادلات انتقال اضافی معرفی شدند. در فرآیند معرفی مجموعه معادلات اضافی، مجموعه معادلات اولیه نیز باید اصلاح گردند. این اصلاحات شامل معرفی جزء حجمی α برای فازهای بعدی است. در این روش حجم فاز q ام با معادله زیر تعریف می‌شود (فلوئنت ۲۰۰۶):

$$V_q = \int_0^v \alpha_q dv \quad (1)$$

که در معادله بالا α_q جزء حجمی فاز q ام است و در این مسئله q برای دو فاز آب (w) و رسوب (s) به کار برده شده است. بنابراین:

$$\sum_{q=w,s} \alpha_q = 1 \quad (2)$$

و چگالی مؤثر برای هر فاز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

بدین ترتیب معادله پیوستگی و مومنتم برای هر فاز به صورت زیر اصلاح می‌شود.

۱- معادله پیوستگی برای فاز q ام:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = 0.0 \quad (4)$$

که در معادله بالا \bar{v}_q و ρ_q به ترتیب نشان دهنده سرعت و چگالی فاز q ام است.

۲- معادله مومنتم برای هر یک از فازهای آب و رسوب:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_w \rho_w \bar{v}_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \bar{v}_w \bar{v}_w) = \quad (5)$$

$$-\alpha_w \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_w + \alpha_w \rho_w \bar{g} + \bar{R}_{ws}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) = \quad (6)$$

$$-\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} + \bar{R}_{sw}$$

که در این معادلات \bar{R}_{sw} و \bar{R}_{ws} نیروی بین فاز، p نشان دهنده فشار به اشتراک گذاشته شده با تمامی فازها، p_s فشار فاز جامد و $\bar{\tau}_q$ تانسور تنش- کرنش برای فاز q ام است که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\tau_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \bar{v}_q + \nabla^T (\bar{v}_q) \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \cdot \nabla \bar{v}_q \bar{I} \quad (7)$$

$$= w, s$$

μ_q و λ_q در این معادله به ترتیب بر لزجت بالک و برشی

گرفتن انتقال مومنتم بین فاز آب و رسوب، هیدرودینامیک حوضچه را به صورت سه بعدی و از حل معادلات ناویر استوکس به دست آوردند و ذرات رسوب را با روش روندیابی در آب دنبال کردند.

در این بررسی با استفاده از یک مدل دو فاز و اولری- اولری دقیق تر نسبت به پژوهش‌های گذشته، جریان سه بعدی آب و رسوب در سیزده حوضچه مستطیلی شکل شهری با ابعاد گوناگون بررسی شده و اثر این تغییرات بر راندمان تله اندازی آن محاسبه می‌شود. برتری این روش نسبت به روش‌های به کار رفته در بررسی‌های پیشین دقیق تر بودن آن در محاسبه خصوصیات فاز رسوب است. به عبارت دیگر در این روش برای فاز رسوب، یک معادله مومنتم مجزا حل و در نتیجه، میدان سرعت جداگانه‌ای غیر از میدان سرعت جریان محاسبه خواهد شد، در حالیکه در بررسی‌های قبلی خصوصیات فاز رسوب از حل معادله‌ای اسکالر و یا از روندیابی ذرات به دست می‌آمد، همچنین خصوصیات فاز رسوب در معادله مومنتم این فاز با استفاده از تئوری جنبشی^۱ محاسبه می‌شود که در نوع خود جدید است.

مدل عددی

برای حل معادلات جریان و رسوب در حوضچه از نرم افزار تجاری فلوئنت ۶/۳/۲۶ استفاده شده است. در مدل عددی فلوئنت سه مدل چند فاز اولری- اولری وجود دارد: مدل حجم سیال^۲، مدل اختلاط^۳ و مدل اولرین^۴. در این پژوهش از مدل دقیق تر اولرین برای شبیه سازی فاز جریان و رسوب بهره برده شده است. مدل اولرین پیچیده ترین مدل چند فاز در نرم افزار فلوئنت بوده که مجموعه‌ای از معادلات مومنتم و پیوستگی را برای هر فاز حل می‌کند. معادلات حاکم که مدل عددی اولرین از طریق آن میدان جریان و رسوب را حل می‌کند در ادامه آورده شده است.

معادلات حاکم

برای تغییر از یک مدل یک فازه که در آن فقط یک مجموعه از معادلات انتقال حل می‌شود به یک مدل چند

1- Kinetic Theory

2- VoF

3- Mixture

4- Eulerian

و با چگالی kg/m^3 ۲۶۵۰ به نرم‌افزار معرفی شد. برای شروع محاسبات فرض شد که حفره آزمایشگاهی به طور کامل پر از آب بوده و هیچ رسوبی در آن وجود ندارد.

اندازه‌گیری‌ها در صفحه مرکزی حفره انجام شده است، پس تأثیر دیوارها روی نتایج کم می‌باشد به همین دلیل برای کاهش زمان محاسبه، شبیه‌سازی دوبعدی انجام شده است. پس از اتمام شبیه‌سازی، پروفیل‌های سرعت و غلظت در مقاطع مشخص شده در شکل ۱، برای مقایسه بهتر، در کنار نتایج آزمایشگاهی ترسیم شدند. این نمودارها در شکل ۳ قابل مشاهده هستند. پروفیل سرعت در شکل ۳ نشان از هماهنگی به نسبت خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی دارد. با توجه به شکل ۳، نتایج میدان غلظت دارای خطای به نسبت زیادی به ویژه در نقاط نزدیک به کف است. علت اصلی این تفاوت را می‌توان در نحوه اعمال غلظت ورودی در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی دانست. فن‌راین (۱۹۸۶) در مدل آزمایشگاهی خود ۲۵٪ از رسوب را به صورت بار بستر و ۷۵٪ آن را به صورت بار معلق در نظر گرفته است، اما در این مدل عددی تمامی بار به صورت معلق در نظر گرفته شده است. همین دلیل سبب شده است تا در مدل عددی میزان غلظت در نواحی نزدیک به کف کمتر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی شود، اما مدل عددی میزان غلظت در نواحی بالایی و همچنین شکل پروفیل غلظت را به خوبی پیش‌بینی کرده است. استفاده از قطر متوسط ذرات در مدل عددی به جای توزیع دانه‌بندی استفاده شده در آزمایشگاه از دیگر دلایل خطا است.

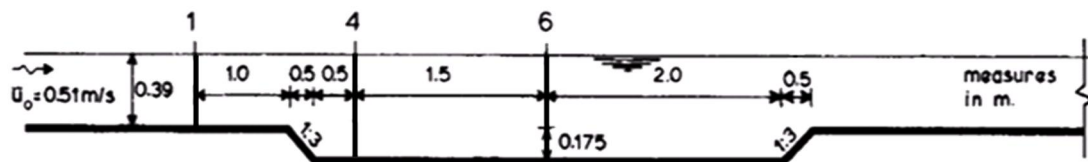
فاز q ام دلالت دارد. با تعیین مقدار مناسب برای نیروی بین‌فازی \bar{R}_{pq} معادله بالا به شکل بسته درمی‌آید. این نیرو به عواملی همچون اصطکاک، فشار، چسبندگی و برخی اثرات دیگر بستگی دارد. برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل $k-\varepsilon$ RNG در حالت Dispersed استفاده شده است. مدل $k-\varepsilon$ RNG گسسته، زمانی مناسب است که فاز(های) ثانویه رقیق باشد، همچنین عملکرد این مدل، در این پژوهش نسبت به سایر مدل‌ها بررسی و نتایج بهتری را نشان داد.

صحت‌سنجی مدل عددی

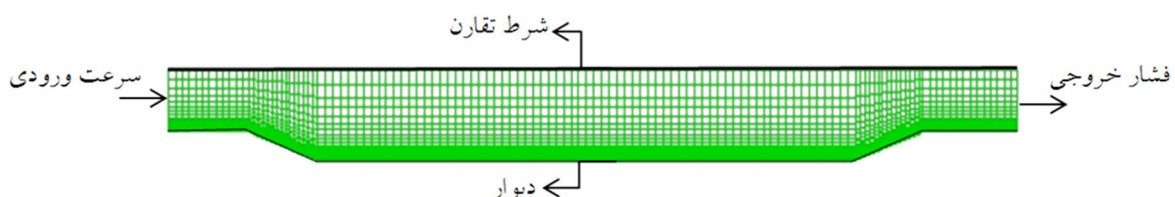
در این بخش حفره آزمایشگاهی فن‌راین (۱۹۸۶) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلف هلند بررسی می‌شود. حفره آزمایشگاهی به همراه مقطعی که در آن پروفیل‌های سرعت و غلظت اندازه‌گیری شده است در شکل ۱ قابل مشاهده است. کانال شبیه‌سازی دارای ۱۵ متر طول، ۰/۷ متر عمق و ۰/۵ متر عرض است. عمق جریان و سرعت ورودی ثابت و به ترتیب برابر $0.39 m$ و $0.51 m/s$ نگه داشته شده است و غلظت ذرات رسوب ورودی $0.04 kg/m^3$ است (فن‌راین، ۱۹۸۶).

شبیه‌سازی جریان و رسوب در حفره

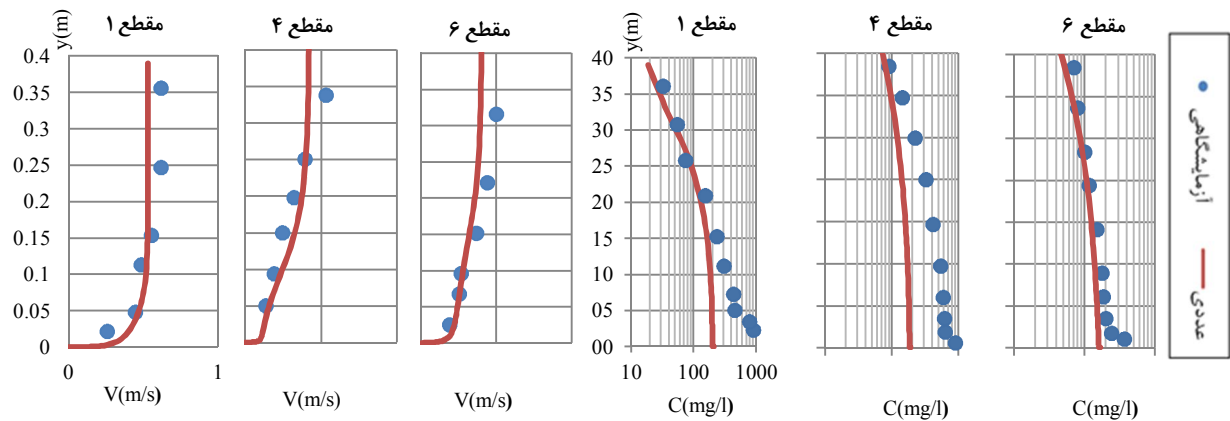
برای انفصال میدان حل در حفره از شبکه‌بندی مستطیلی 35×340 بهره برده شده است. شبکه‌بندی حفره به همراه شرایط مرزی در شکل ۲ قابل مشاهده است. برای فاز اولیه، آب با وزن مخصوص kg/m^3 ۹۹۸/۲ و برای مدل‌سازی ذرات رسوب یک فاز دیگر به صورت دانه‌ای (Granular)، با قطر متوسط ۱۶۰ میکرون



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی فن‌راین (۱۹۸۶)



شکل ۲- شبکه‌بندی حفره آزمایشگاهی فن‌راین به همراه شرایط مرزی



شکل ۳- مقایسه پروفیل‌های سرعت و غلظت در مقاطع مختلف.

حداکثر سیلاب طراحی می‌شوند دارای ابعاد متفاوت بوده و با توجه به شیب تند مناطق کوهستانی در شمال تهران، معمولاً به صورت چند حوضچه متوالی طراحی و اجرا شده‌اند. در شکل ۴ نمونه‌ای از این حوضچه‌ها نشان داده شده است. در این پژوهش از حوضچه‌ای با ابعاد $\frac{1}{3}$ میانگین تقریبی ابعاد حوضچه‌های شهر تهران به‌عنوان حوضچه مرجع برای شروع شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است و سپس ابعاد حوضچه مرجع تغییر داده شده و اثر آن بر راندمان بررسی می‌گردد و در نهایت نیز نتایج به ابعاد واقعی تعمیم داده شده است.

بررسی موردی حوضچه‌های رسوب‌گیر شهر تهران

قرار گرفتن شهر تهران در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز و همچنین شیب طبیعی و هندسه زمین در این نواحی سبب شده است تا هنگام بارندگی مقادیر زیادی رسوب همراه آب وارد شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران شود. بررسی‌های طرح جامع نشان داده است که سالانه ۴ الی ۶/۵ تن از هر هکتار از حوضه‌های آبریز تهران گل و لای و رسوب‌کننده شده وارد مجاری تخلیه می‌شود (طرح جامع هدایت آب‌های سطحی تهران، ۱۳۷۸). حوضچه‌های شهر تهران که به طور معمول بر مبنای دو هدف رسوب‌گیری و کاهش دبی



شکل ۴- حوضچه رسوب‌گیر در زهکشی شهری واقع در دارآباد، الف) از جلو، ب) از بالا

اساس سیزده حوضچه مختلف با ابعاد ذکر شده در جدول ۱ انتخاب شدند. براساس جدول ۱ انتخاب ابعاد در سه حالت و با تغییر در ابعاد حوضچه مرجع انجام شده است. در مرحله اول فرض شد که مقدار عرض ثابت بماند و مقدار طول و ارتفاع به طور مناسب کاهش و افزایش یابد. به همین ترتیب در مرحله دوم و سوم مقدار طول و ارتفاع ثابت فرض شد و دو بعد دیگر تغییر یافت.

بررسی اثر تغییرات طول، عرض و ارتفاع حوضچه

بر راندمان

در این پژوهش برای بررسی اثر تغییرات طول، عرض و ارتفاع حوضچه فرض شده است که ابعاد ورودی و خروجی، با تغییر در ابعاد اصلی حوضچه ثابت باقی بماند. بنابراین، در شبیه‌سازی‌ها تا حد امکان تلاش شده است شرایط ورودی و خروجی ثابت بماند. بر همین

در تمام مدل‌ها، مقدار حجم حوضچه‌ها ثابت و برابر حجم حوضچه مرجع در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- ابعاد حوضچه‌های شبیه‌سازی شده (متر)

شماره حوضچه	مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
		عرض ثابت	طول ثابت	ارتفاع ثابت									
طول	۲/۵	۱/۲۵	۳/۷۵	۵	۶/۲۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۱/۵	۲	۳	۳/۵
عرض	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۰/۷۵	۱	۱/۷۵	۲/۲۵	۲/۰۸	۱/۵۶	۱/۰۴	۰/۸۹
ارتفاع	۰/۲۲۵	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۳۷۵	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۱۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵
حجم	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۵

شرایط مرزی و هیدرولیکی

میدان حل با در نظر گرفتن دقت شبیه‌سازی و صرفه‌جویی در زمان محاسبه، با حدود ۳۰۰۰۰۰ شبکه مستطیلی منفصل شد. شرط مرزی ورودی به صورت سرعت یکنواخت و برای هر دو فاز آب و رسوب برابر با 0.224 m/s در نظر گرفته شده است. میزان غلظت ورودی ذرات رسوب به صورت جزء حجمی برابر با 0.019 اعمال شد. قطر ذرات به صورت متوسط برابر $5/5$ میلی‌متر لحاظ شده است. برای شرط مرزی سطح آب فرض شد گرادیان تمامی متغیرها صفر باشد. در مرز خروجی شرط مرزی فشار برابر صفر، که فشار جو است قرار داده شد و در تمامی دیواره‌ها شرط مرزی عدم لغزش در نظر گرفته شد.

نتایج

حوضچه با عرض ثابت

مقدار راندمان حوضچه در لحظات مختلف از تفاوت نسبی غلظت ورودی و خروجی رسوب به دست می‌آید. بنابراین برای درک بهتر از عملکرد هر یک از حوضچه‌ها، مقدار راندمان حوضچه‌ها به صورت تابعی از زمان به همراه شکل شماتیک حوضچه‌ها در شکل ۵ ترسیم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت مقدار راندمان حوضچه شماره ۱، که دارای نسبت طول به عرض یک است، به سرعت کاهش یافته و در کمتر از ۲۰۰۰ ثانیه مقدارش به صفر می‌رسد. راندمان حوضچه شماره ۱ در مقایسه با حوضچه مرجع، که با علامت M در شکل نشان داده شده است، دارای اختلاف زیادی است. بنابراین افزایش عمق و کاهش بیش از اندازه طول سبب کاهش راندمان شده است.

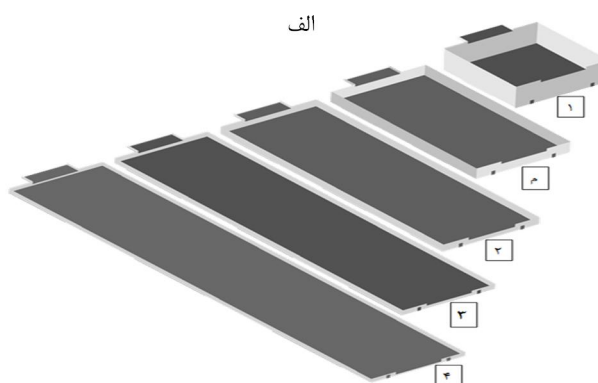
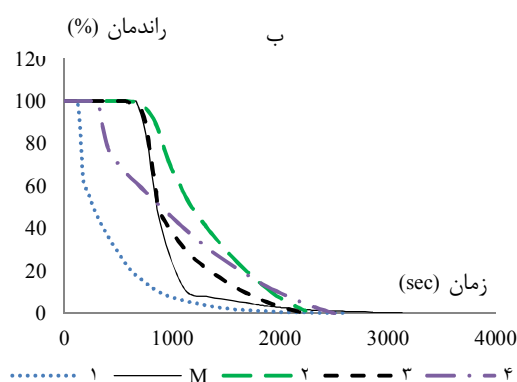
همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، حوضچه شماره ۲ که دارای نسبت طول به عرض ۳:۱ است، دارای بهترین عملکرد در مقایسه با سایر موارد است. عملکرد مناسب‌تر حوضچه شماره ۲ را می‌توان به هیدرولیک متفاوت ایجاد شده در این حوضچه نسبت داد. حوضچه‌های شماره ۳ و ۴، با وجود نسبت طول به عرض ۴:۱ و ۵:۱ به ترتیب، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به حوضچه شماره ۲ داشته است. در این حوضچه‌ها، با افزایش طول حوضچه مقدار عمق حوضچه بیش از اندازه کاهش یافته است. این کاهش عمق سبب افزایش سرعت جریان در لایه‌های پایینی آب شده است و این افزایش سرعت، موجب افزایش سرعت حرکت ذرات رسوب در کف شده است. به همین دلیل راندمان حوضچه شماره ۴ در ابتدا سریع‌تر از حوضچه مرجع کاهش یافته، اما به مرور زمان مقدار بیشتری پیدا می‌کند و حتی در زمان‌های بعد از ۱۸۰۰ ثانیه بیش از راندمان حوضچه شماره ۲ می‌شود. لازم به ذکر است که منفی شدن راندمان نشان دهنده خروج ذرات ته‌نشین شده در حوضچه به همراه جریان است.

حوضچه با طول ثابت

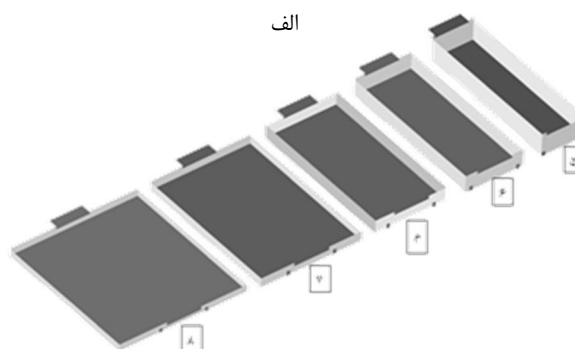
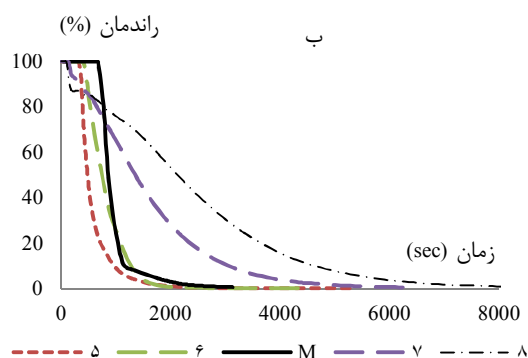
مشابه بخش قبل (حوضچه با عرض ثابت) نمودار تغییرات زمانی راندمان در حوضچه‌های با طول ثابت به همراه شکل شماتیک حوضچه‌های با طول ثابت در شکل ۶ رسم شده است. نمودار راندمان حوضچه‌های شماره ۷ و ۸ مطالب عنوان شده در قسمت قبل را تکمیل می‌کند. در این دو حوضچه به دلیل کاهش عمق نسبت به حوضچه مرجع، ذرات رسوب در زمان خیلی کمی به خروجی‌های موجود در کف رسیده‌اند، اما پس از آن

و به طور کامل مستقل از عمق حوضچه است، به عبارت بهتر ته‌نشینی ذرات به مقدار سطح در دسترس برای ته‌نشینی بستگی دارد و نه حجم. وی همچنین عمقی را برای طراحی مطلوب دانست که از اختلاط ذرات ورودی جریان با آب تصفیه شده خروجی جلوگیری کند. بدین ترتیب و با توجه به نتایج دو بخش قبل می‌توان نتیجه گرفت که، اگر عمق حوضچه بیش از اندازه کوچک در نظر گرفته نشود، درصد جداسازی ذرات در حوضچه فقط به مساحت سطح آن بستگی دارد.

نمودار راندمان با شیب کمتری کاهش یافته است و پس از حدود ۵۰۰۰ ثانیه به صفر رسیده است. مقایسه تغییرات زمانی راندمان حوضچه‌های ۵، ۶ و مرجع حاکی از کاهش راندمان در این دو حوضچه است. بنابراین مقدار راندمان یک حوضچه با افزایش مقدار عرض و کاهش عمق، افزایش زیادی داشته است. با این توضیح می‌توان نتیجه‌گیری هیزن (۱۹۰۴) در مورد حوضچه‌ها را تأیید کرد. وی در کار خود به این نتیجه رسیده بود که ته‌نشینی ذرات بستگی به مساحت کف ناحیه‌ای دارد که برای ته‌نشینی در نظر گرفته شده است



شکل ۵- الف) شکل شماتیک حوضچه‌های با عرض ثابت، ب) تغییرات راندمان حوضچه با عرض ثابت



شکل ۶- الف) شکل شماتیک حوضچه‌های با طول ثابت، ب) تغییرات راندمان حوضچه با طول ثابت

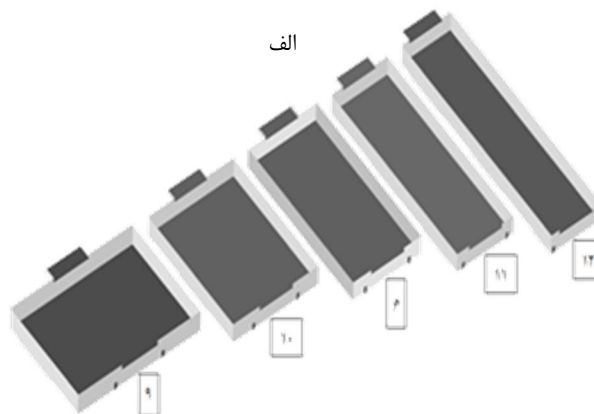
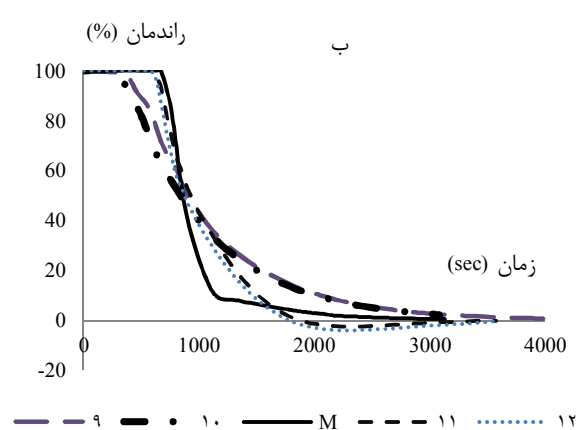
زمان کوتاه‌تری نسبت به حوضچه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ به خروجی رسیده‌اند و در نتیجه راندمان حوضچه کاهش یافته است. اما روند کاهش راندمان در حوضچه‌های ۹ و ۱۰ کمتر از نرخ کاهش راندمان در دو حوضچه ۱۱ و ۱۲ است. از همین رو افزایش عرض حوضچه سبب می‌شود تا راندمان حوضچه در مدت زمان طولانی‌تری به صفر برسد.

حوضچه با عمق ثابت

همانند دو بخش قبل تغییرات راندمان حوضچه با زمان به همراه شکل شماتیک حوضچه‌های با عمق ثابت در شکل ۷ رسم شده است. نمودار تغییرات راندمان در حوضچه‌های شماره ۹ و ۱۰ با یکدیگر و همچنین حوضچه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ با یکدیگر به طور تقریبی یکسان است. در حوضچه‌های شماره ۹ و ۱۰، ذرات رسوب پس از مدت

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش عرض و کاهش عمق در حوضچه‌های ۵ تا ۸ سبب افزایش راندمان تا مقدار ۵۸٪ شده است. همان‌طور که بیان شد دلیل اصلی آن به افزایش سطح حوضچه ارتباط دارد. با افزایش سطح حوضچه، بر خلاف حوضچه‌های با عرض ثابت، ذرات رسوب به واسطه نواحی چرخشی ایجاد شده در حوضچه پخش می‌گردند و مقدار شار جرمی خروجی رسوب کاهش می‌یابد. مقدار راندمان حوضچه‌های شماره ۹ و ۱۰ افزایش کمی، با افزایش عرض نشان داده است. مقدار راندمان در دو حوضچه ۱۱ و ۱۲ پس از ۱۸۰۰ ثانیه منفی می‌شود و همین عامل دلیل اصلی کاهش میانگین راندمان در این دو حوضچه است.

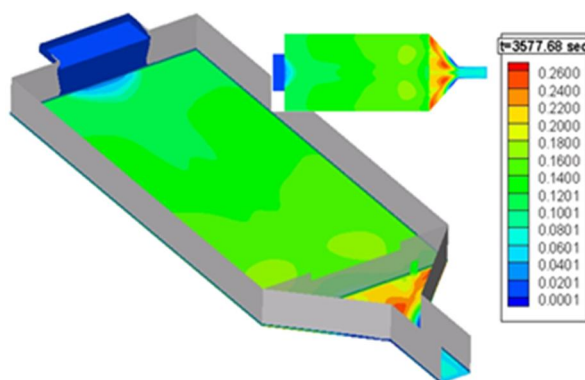
اگر از راندمان رسوب‌گیری در لحظات مختلف در هر حوضچه میانگین‌گیری شود، مقدار راندمان میانگین حوضچه به دست خواهد آمد که می‌تواند برای قضاوت در مورد عملکرد حوضچه‌ها استفاده شود. مقدار میانگین راندمان حوضچه‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است. براساس جدول ۲، مقدار راندمان تا حوضچه شماره ۲ افزایش یافته، اما پس از آن کاهش یافته است. میزان راندمان حوضچه‌های ۳ و ۴ اگرچه کمتر از راندمان حوضچه شماره ۲ است، اما با این وجود از راندمان حوضچه مرجع بیشتر است. در نتیجه افزایش طول و کاهش عمق در یک حوضچه با حجم ثابت سبب افزایش راندمان تا یک مقدار بیشینه شده و سپس مقدار راندمان کاهش می‌یابد.



شکل ۷- الف) شکل شماتیک حوضچه‌های با عمق ثابت، ب) تغییرات راندمان حوضچه با عمق ثابت

جدول ۲- تغییرات میانگین راندمان در حوضچه‌ها

شماره حوضچه	مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میانگین راندمان یک ساعته (%)	۲۷	۱۱	۳۴	۲۸	۳۰	۱۶	۲۲	۴۲	۵۸	۳۱	۲۹	۲۶	۲۷



شکل ۸- توزیع رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه

در بررسی سجادی و شفاعی (۱۳۸۸)، نشان داده‌اند که افزایش طول سبب افزایش بیشتری در راندمان نسبت به

با توجه به بررسی انجام شده روی پژوهش‌های قبلی، پژوهش‌گران در بیشتر بررسی‌های انجام شده و از جمله

شکل زمانی به دست آمد. در این بین تغییرات عرض بیشترین اثر و تغییرات عمق کمترین اثر را بر روی راندمان داشت. نتایج این پژوهش بررسی‌های هیزن (۱۹۰۴) را مبنی بر اینکه ته‌نشینی ذرات بستگی به مساحت کف ناحیه ته‌نشینی دارد را تأیید کرد. نتایج این پژوهش در شرایط این مسئله اعم از شکل هندسی خاص حوضچه‌های شهری و درشت دانه بودن ذرات رسوب به دست آمده است و فقط در شرایط مشابه دارای کاربرد است. پیشنهاد می‌شود در ادامه پژوهش‌ها اثر تغییرات ابعاد حوضچه روی راندمان به ازای افزایش و کاهش مقداری ثابت در حجم حوضچه بررسی شود.

منابع

۱. خادمی شمامی م. و امید م. ح. ۱۳۸۵. مطالعه آزمایشگاهی اثر تیغه هدایت کننده عرضی بر راندمان تله‌اندازی حوضچه رسوب‌گیر. هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. گروه آبیاری. دانشگاه تهران. ۹ ص.
۲. سجادی س. م. و شفافی بجستان م. ۱۳۸۸. آنالیز حساسیت ابعاد حوضچه رسوب‌گیر آبیاری با استفاده از مدل ریاضی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز. ۶ ص.
۳. طرح جامع هدایت آب‌های سطحی تهران، ۱۳۷۸. جلد پنجم. گزارش مطالعات حوزه‌های کوهستانی. مهندسیین مشاور عمران محیط‌زیست. ۵۷ ص.
۴. ناصر غ. ر. ۱۳۷۲. بررسی میدان سرعت و توزیع غلظت در حوضچه‌های ته‌نشینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی. دانشکده فنی مهندسی. دانشگاه تربیت مدرس. تهران. ۱۱۴ ص.
5. Adams E. W. and Rodi W. 1990. Modeling flow and mixing in sedimentation tanks. *J. Hydraulic Engineering*. 116(7): 895-913.
6. Adamsson A. Stovin V. and Bergdahl L. 2003. Bed shear stress boundary condition for Storage Tank sedimentation. *J. of Environmental Engineering*. 129(7): 651-658.
7. Dufresne M. Vazquez J. Terfous A. Ghenaim A. and Poulet J. B. 2009. Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank. *Computers & Fluids* 38(5): 1042-1049
8. Fluent User's Guide and Theory Guide 6.3.26. 2006. Fluent Inc.

افزایش عرض خواهد شد، اما در این پژوهش عکس این قضیه به دست آمده است. دلیل اصلی این اختلاف در هیدرولیک متفاوت رسوب در این مطالعه است. به عبارت دیگر، حرکت ذرات رسوب در این پژوهش همانند شکل ۸، به دلیل درشت دانه بودن ذرات به طور کامل به شکل بار بستر انجام می‌شود. از همین رو حرکت ذرات رسوب به صورت بار بستر از یک طرف و قرارگیری نامناسب دو دریچه در کف از طرف دیگر سبب شده است تا مقدار راندمان، با افزایش طول در برخی شبیه‌سازی‌ها از جمله حوضچه‌های ۳ و ۴ کمتر از حوضچه ۲ برآورد شود و همچنین راندمان حوضچه‌های ۷ و ۸ با افزایش قابل زیادی در راندمان روبرو شوند.

به عبارت بهتر، به دلیل آنکه ذرات رسوب در همان ابتدای حوضچه ته‌نشین می‌شوند، افزایش طول بی‌اثر مانده و نتوانسته تأثیر خود را نشان دهد، چرا که دلیل افزایش طول در حوضچه‌ها به این مطلب برمی‌گردد که طول لازم برای ته‌نشینی ذرات را طولانی کنند تا ذرات بیشتری در این فاصله ته‌نشین شوند، اما به دلیل سرعت زیاد جریان در کف، ذرات رسوب به سمت انتهای حوضچه حرکت کرده و این افزایش طول بی‌نتیجه مانده است. با این توضیح باید دانست که نتایج این پژوهش عمومیت نداشته و نمی‌توان نتیجه‌گیری کلی نمود که افزایش طول در افزایش راندمان، کم اثرتر از افزایش عرض باشد، بلکه فقط با توجه به شرایط خاص این مسئله اعم از شکل هندسی، خصوصیات فیزیکی ذرات رسوب (درشت‌دانه بودن ذرات) که مختص به حوضچه‌های رسوب‌گیر شهری تهران است، چنین نتایجی به دست آمده است. البته به طور کامل مشهود است که میزان راندمان در تمامی حوضچه‌ها پایین بوده و بنابراین طراحی این نوع سازه‌ها و محل دریچه‌ها نیاز به بازنگری دوباره دارد.

نتیجه‌گیری

پس از مقایسه نتایج مدل عددی فلوئنت با نتایج آزمایشگاهی فن‌راین (۱۹۸۶) و پیش‌بینی میدان سرعت و غلظت در یک حفره، از عملکرد صحیح مدل دو فازی اطمینان به دست آمد. سپس سیزده حوضچه با ابعاد گوناگون برای بررسی اثر شکل حوضچه شهری بر روی راندمان رسوب‌گیری، با الگوبرداری از حوضچه‌های شهری، شبیه‌سازی شدند و نمودار تغییرات راندمان به

9. Hazen A. 1904. On sedimentation. ASCE. 53:45-71.
10. Persson J. 2000. The hydraulic performance of ponds of various layouts. urban water. 2(3): 243-250.
11. Reed S. H. Crites R. W. and Middlebrooks E. J. 1995. Natural systems for waste management and treatment (2nd Ed.). New York: McGraw-Hill.
12. Sammarraee M. Al. Chan A. Salim S. M. and Mahabaleswar U. S. 2009. Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I: Particle settling performance. Chemical Engineering Journal. 152(2-3): 307-314.
13. Shahrokhi M. Rostami F. Said Md. A. Yazdi S. R. and Syafalni S. 2013. Experimental investigation of the influence of baffle position on the flow field, sediment concentration, and efficiency of rectangular primary sedimentation tanks. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 139(1): 88-97.
14. Stamou A. I. 2008. Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. Chemical Engineering and Processing. 47(8): 1179-1189.
15. Tarpagkou R. and Pantokratoras A. 2013. CFD methodology for sedimentation tanks: The effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations. Applied Mathematical Modelling. 37(5): 3478-3494.
16. Thackston E. L. Shields F. D. and Schroeder P. R. 1987. Residence Time Distributions of Shallow Basins. Journal of Environmental Engineering. 113(6): 1319-1332.
17. Van Rijn L. C. 1986. Mathematical modeling of suspended sediment in nonuniform flows. Journal Hydraulic Engineering. 112(6): 433-455.
18. Wang X. Yang L. Sun Y. Song L. Zhang M. and Cao Y. 2008. Three-dimensional simulation on the water flow field and suspended solids concentration in the rectangular sedimentation tank. Journal Environmental Engineering. 134(11): 902-911.