

برآورد دانه‌بندی و نحوه گسترش رسوب در مقطع خروجی و کف حوضچه ته‌نشینی با استفاده از مدل اولری - لاگرانژی

حسین غفاریان روح‌پرور^۱، محمود فغفور مغربی*^۲ و علی نصیریان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشجوی دکتری عمران- آب دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

حوضچه‌های ته‌نشینی عمدتاً برای حذف رسوبات اضافی وارد شده به کانال‌های آبیاری و یا کانال‌های منشعب از رودخانه‌ها و منتهی به توربین‌ها استفاده می‌شوند. این سازه‌ها همچنین در طرح‌های تصفیه پساب در دو نوع اولیه و ثانویه به کار رفته است که اکثر مطالعات صورت گرفته، در این حوزه متمرکز است. پژوهش‌های بسیاری بر عملکرد رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ته‌نشینی که تحت تأثیر چگالی جریان، نیروی ثقل و غلظت سیال است انجام گرفته و تأثیر آن بر الگوهای جریان و چگالی در حوضچه‌های ته‌نشینی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، فرآیندهای هیدرودینامیکی موجود در حوضچه‌های ته‌نشینی، با استفاده از روش احجام محدود و به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) مدل‌سازی شده و ذرات رسوب با فرض حرکت لاگرانژی تحلیل شدند. پس از شبیه‌سازی و به دست آوردن الگوی جریان، تحلیلی از نحوه حرکت ذرات در حوضچه ته‌نشینی و راندمان تله‌اندازی حوضچه ته‌نشینی ارائه گردید که بر اساس آن، گستره قطر و فراوانی ذرات در مقطع خروجی و کف حوضچه ته‌نشینی به دست آمد. با استفاده از این مدل، مشخص گردید که در حوضچه‌ای با شرایط ذکر شده، تقریباً تمامی ذرات با قطر بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر به تله می‌افتند.

واژگان کلیدی: حوضچه‌های ته‌نشینی، رسوب‌گذاری، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، معادلات استوکس.

۱- مقدمه

پیش‌بینی الگوهای جریان سیال و فرایند پخش ذرات رسوب در طول حوضچه انجام می‌شود. Larsen [۱] برای اولین بار از مدل محاسبه دینامیکی سیال برای تصفیه کننده‌های ثانویه مختلف استفاده کرد. Shamber و Larock [۲] جریان درون حوضچه‌های ته‌نشینی را به کمک روش اجزای محدود و برای جفت معادلات حاکم بر جریان سیال و رسوب حل کردند. آن‌ها از اثرات اندرکنش ذرات بر سیال و سرعت ته‌نشینی در این مدل صرف‌نظر نمودند. Long و همکاران [۳] روی دینامیک جریان در حوضچه‌های ترسیب ثانویه مطالعه کردند و مدلی برای جریان دو فازه سیال- جامد در جریان آشفته درون حوضچه به صورت سه بعدی و دو سیال تهیه کردند. تصفیه کننده دوار دو بعدی توسط Zhou و McCorquodale [۴] مدل شد. آن‌ها برای شبیه‌سازی تغییرات چگالی نسبت به زمان به منظور کنترل روند گسترش آن و برای مانع شدن از واگرایی کد از مدل گذرا^۲ استفاده کردند. این مدل در حالت حدی به شرایط پایدار^۳ منتهی می‌گشت. مدل آن‌ها شامل دو قسمت بود: مدل آماده کننده سرعت

در تصفیه‌خانه‌ها، رسوب‌گیری به کمک نیروی ثقل با استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی، یکی از روش‌های مرسوم برای از بین بردن ذرات معلق آب است. این روند با استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی صورت می‌گیرد. این حوضچه‌ها اجزای اصلی در تصفیه آب هستند. هزینه ساخت حوضچه‌های ته‌نشینی بالا بوده و در حدود ۳۰ درصد هزینه کلی یک تصفیه خانه را به خود اختصاص می‌دهد و کارایی این حوضچه‌ها، به صورت مستقیم یا غیرمستقیم روی کارایی سایر بخش‌های تصفیه و افزایش کیفیت آب اثر دارد. در نتیجه طراحی حوضچه‌های ته‌نشینی با خاصیت دفع ذرات معلق و اثرات هیدرولیکی بالا موضوع بسیاری از مطالعات نظری، آزمایشگاهی و عددی بوده است. مطالعات آزمایشگاهی زمان‌بر بوده و نیاز به هزینه‌های بالا دارد، لذا معمولاً مطالعات و شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرده و به نتایج مناسبی منتهی شود.

اخیراً در بسیاری از تحقیقات از تکنیک‌های محاسبات دینامیکی سیال (CFD)^۱ برای مدل کردن روند ته‌نشینی در حوضچه‌های ته‌نشینی استفاده می‌شود. این فعالیت‌ها به منظور

2- Transient
3- Steady State

1- Computational Fluid Dynamics

آوردند. Adams و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل آشفتنگی $k-\epsilon$ جریان را در حوضچه ترسیب مدل‌سازی کردند. در این زمینه Stamou و همکاران [۱۵] با استفاده از مدل آشفتنگی $k-\epsilon$ و اسکیم QUICK جریان را در حوضچه ترسیب مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند و با استفاده از این مدل بافل‌هایی را درون حوضچه‌های ته‌نشینی مدل کردند که منجر به استخراج نتایج مناسبی گردید. آن‌ها برای پیش‌بینی کارایی حوضچه‌های ته‌نشینی از FTC^۱ استفاده کردند. Ashjari [۱۶] با استفاده از روش $k-\epsilon$ غیرخطی و FTC جریان را درون حوضچه تحلیل کرده و کارایی حوضچه‌های ته‌نشینی را برآورد نمودند.

در این تحقیق، جریان درون حوضچه‌های ته‌نشینی با استفاده از یک مدل محاسباتی دو بعدی که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شده است مطالعه می‌شود. برای این امر نخست با استفاده از مدل عددی حجم محدود با الگوریتم SIMPLE و به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته، جریان داخل حوضچه مدل شده و خطوط جریان استخراج می‌شود. سپس با تزریق ذرات رسوب که دارای چگالی و قطرهای مشخصی هستند و به کمک فرض حرکت لاگرانژی مسیر حرکت آن‌ها به دست می‌آید و الگوی جریان، نسبت دانه‌بندی ذرات و وزن ذرات در کف و خروجی حوضچه استخراج می‌شود. در این تحقیق مدل‌سازی با فرض پایداری و یکنواخت بودن جریان انجام شده است.

۲- معادلات حاکم

تحلیل جریان رسوب درون حوضچه‌های ته‌نشینی به دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول با استفاده از دیدگاه اولری به شبیه‌سازی جریان پرداخته می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال در این بخش، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند که به معادلات ناویر-استوکس معروفند. معادلات حاکم مورد استفاده در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) با استفاده از متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر-استوکس در فضای فیزیکی به دست می‌آیند. اغتشاش در جریان در اثر ناپایداری جریان‌های آرام ایجاد می‌شود. در حالت کلی وجود ناپایداری در جریان سبب ایجاد ساختمان موجی شکل در جریان شده که می‌تواند انرژی جریان متوسط را جذب نماید. گردابه‌های بزرگ، انرژی اخذ شده از جریان متوسط را به تدریج به گردابه‌های کوچک منتقل نموده و سپس این انرژی به گرما تبدیل می‌شود.

سرعت و لزجت آشفتنگی، و مدل انتقال دهنده ذرات برای تعیین غلظت آن‌ها، شبیه‌سازی به کمک محاسبات دینامیک جریان نیز برای تحلیل انتقال ذرات رسوب با اندازه‌های مختلف استفاده شد. از این مدل برای برآورد اثرات پالایش رسوب در مسیر جریان استفاده شد، که می‌تواند اطلاعاتی را در مورد پخش، انتشار ذرات و نسبت ذرات رسوب نموده به کل ذرات در اختیار قرار دهد. اطلاعاتی از این دسته می‌تواند برای برآورد راندمان در روند رسوب‌گذاری استفاده شود. سجادی و شفافی بجستان [۵] مدل‌هایی را برای طراحی حوضچه‌های ته‌نشینی مطالعه کرده و عملکرد آن‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی مورد ارزیابی قرار دادند.

خادمی و همکاران [۶] با روش آزمایشگاهی و عددی به بررسی اثر تیغه عمودی مستغرق بر راندمان تله‌اندازی در حوضچه‌های ته‌نشینی آبیاری پرداختند. آن‌ها نشان دادند که زمانی که جت وارد شده از کانال بالا دست، تغییرات شدید عرضی سرعت را در حوضچه به وجود می‌آورد، نصب تیغه در عمق استغراق به میزان ۱۵ درصد افزایش راندمان به میزان حداکثر ۸/۵ درصد را در پی دارد. شفافی بجستان و خمینی بزاز [۷] اندازه‌گیری‌هایی را در کانالی بتنی به طول تقریبی ۲۰۰ متر با مقطع مستطیلی و عرض کف یک متر که توسط پمپاژ از رودخانه کارون تغذیه می‌شد، انجام دادند. برای تنظیم دبی ورودی، دریچه کشویی در ابتدای کانال نصب گردید و برای قرائت دبی از یک سر ریز مستطیلی لبه تیز استفاده شد. سرریز با استفاده از ورق گالوانیزه ساخته شد و در پائین دست دریچه کانال نصب گردید. در سال‌های اخیر از روش ردیابی ذرات با استفاده از مدل‌های اولری-لاگرانژی برای بررسی تله‌اندازی رسوبات استفاده شده است. Maxey [۸] در قسمت حرکت ذره در یک میدان جریان که در یک جریان آشفته ایجاد شده است از یک مدل لاگرانژی استفاده نموده در حالی که مدل جریان سلولی در آن، خود به وسیله یک دیدگاه اولری تولید شده است. همچنین Nielsen [۹] با استفاده از اصل روی‌هم‌گذاری، مسیر حرکت ذرات جامد و حباب را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که با تقریب خوبی می‌توان چنین کاری را در جریان‌های با شتاب کم در مقایسه با شتاب جاذبه g انجام داد. در این مورد می‌توان به کارهای Stovin و Saul [۱۰] و Sammarrae و همکاران [۱۱] نیز اشاره نمود. Stamou [۱۲]، بهینه‌سازی ابعاد و هندسه حوضچه‌های ترسیب را بررسی نمود. Imam و همکاران [۱۳] معادلات جریان را با فرض وجود گردابه‌های ثابت حل کردند و موفقیت‌هایی در زمینه پیش‌بینی مشخصات جریان بدست

و دومی براساس یک تحلیل اولری که به صورت عام در میدان جریان برقرار است حاصل می‌شود، مبنای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره می‌باشد. از آنجائی که تفاضل وزن مخصوص ذره و سیال مجاور آن منجر به نیروهایی می‌شود که ذره را از مسیر خطوط جریان منحرف می‌سازد، می‌توان ادعا نمود که استفاده از سرعت سقوط ذره به عنوان تفاضل سرعت‌های لاگرانژی و اولری دقیقاً منطبق بر واقعیت است. در روند تحلیل و مدل‌سازی حرکت ذرات رسوب، از تأثیر متقابل ذرات بر یکدیگر صرف‌نظر شده و نیروهای حاکم، شامل نیروهای مقاومت در برابر حرکت، سبک‌کنندگی و وزن ذرات می‌باشند. برای ذره در حال سقوط با فرض سقوط آزاد می‌توان از رابطه تعادل نیروها رابطه زیر را در نظر گرفت [۱۹]:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho_w A_p V_s^2 \quad (۴)$$

که در این رابطه F_D نیروی رانش، ρ_w جرم حجمی آب، C_D ضریب مقاومت در برابر حرکت، A_p سطح مقطع ذرات و V_s سرعت نسبی حرکت ذره در سیال است. با کاهش قطر دانه‌ها از نیروی رانش ذرات نیز کاسته شده و تبعیت ذرات از خطوط جریان بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که هر چه قطر ذرات رسوب کمتر باشد مقدار عدد رینولدز که با قطر ذرات رسوب ارتباط مستقیم دارد کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۵) با کاهش عدد رینولدز، به مقدار ضریب رانش (C_D) افزوده می‌شود. سرعت سقوطی که از رابطه استوکس بدست می‌آید، با قطر ذرات ارتباط مستقیم داشته و با ضریب رانش ارتباط معکوس دارد. در جریان با اعداد رینولدز کمتر از ۰/۱ ضریب C_D از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} : \text{Re} < 0.1 \quad (۵)$$

همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، این رابطه در اعداد رینولدز بزرگتر از ۰/۱ شروع به انحراف از نتایج آزمایشگاهی می‌کند. برای برآورد C_D در اعداد رینولدز بالاتر از ۰/۱، مبنای محاسبه نمودار ارائه شده در این شکل می‌باشد.

جهت به دست آوردن معادلات جریان برای گردابه‌های بزرگ لازم است در معادلات جریان سیال، گردابه‌های بزرگ را از گردابه‌های کوچک جدا کرده و سپس گردابه‌های کوچک را مدل نمود. روش‌های ریاضی متعددی وجود دارد که توسط آن می‌توان گردابه‌های بزرگ را از گردابه‌های کوچک جدا کرد. در کلیه این روش‌ها سعی می‌شود از طریق انتگرال‌گیری معادلات جریان برحسب ابعاد هندسی کوچک و یا فیلتر کردن معادلات جریان در فرکانس‌های بالا گردابه‌های کوچک جریان را حذف و یا جدا نمود [۱۷]. معادلات فیلتر شده ناویر-استوکس به صورت زیر می‌باشند [۱۸]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2(\nu + \nu_{sgs}) \frac{\partial \bar{S}_{ij}}{\partial x_j} \quad (۲)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (۳)$$

معادلات (۱) و (۲) به ترتیب معادلات پیوستگی و ممنوم بوده و معادله (۳) نشان دهنده نرخ کرنش زاویه‌ای است که در معادله (۲) ظاهر شده است. در این روابط u_i و u_j به ترتیب نشان دهنده سرعت در راستای افقی و قائم، ν و ρ به ترتیب لزجت سینماتیک و جرم حجمی سیال و ν_{sgs} لزجت مقیاس زیر شبکه^۱ است.

در بخش تحلیل حرکت لاگرانژی که به مطالعه نحوه حرکت ذرات رسوب اختصاص دارد، سرعت سقوط ذرات رسوب با فرض حرکت لاگرانژی و با استفاده از رابطه استوکس به دست می‌آید. فرض جریان لاگرانژی در حالتی که نسبت حجم ذرات کم باشد و حضور ذرات روی جریان اثر گذار نباشد فرض مناسبی می‌باشد [۱۱]. در مدل‌سازی حرکت رسوب درون حوضچه فرض می‌شود که ذرات رسوب دارای حرکت لاگرانژی تحت اثر سرعت جریان پایدار سیال در داخل حوضچه ته‌نشینی به اضافه سرعت ته‌نشینی ذرات تحت اثر معادله استوکس هستند. یعنی هر ذره علاوه بر سرعتی که جریان در دو جهت افقی و قائم به آن دیکته می‌کند، دارای سرعت سقوطی می‌باشد که از رابطه استوکس به دست می‌آید. در واقع باید گفت تفاضل سرعت مطلق ذره از سرعت جریان سیال که اولی از یک تحلیل لاگرانژی بر روی ذره

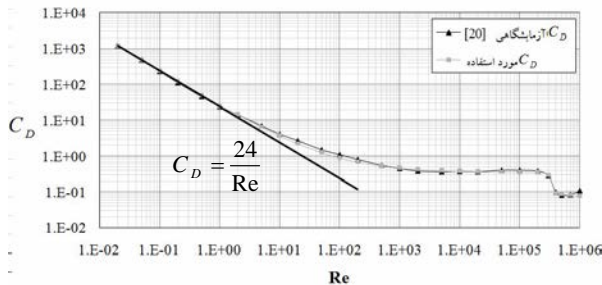
در نظر گرفته شد. در حوضچه‌های ته‌نشینی طولی، رسوبات به طور متناوب از حوضچه تخلیه می‌شوند، لذا تجمع ذرات در کف حوضچه مشکلی ایجاد نخواهد کرد [۳].

پس از اجرای مدل و تحلیل جریان داخل این حوضچه، ذرات رسوب به حوضچه تزریق شد. نتایج ارائه شده توسط Sammarrae و همکاران [۱۱] شامل نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی می‌باشد. در شکل (۳) مقایسه میان نتایج حاصله از برنامه کامپیوتری با داده‌های آزمایشگاهی، برای دانه‌بندی ذرات رسوب در خروجی حوضچه آورده شده است.

که در شکل (۳)، w_o/w_i نشان دهنده نسبت وزن رسوبات خروجی در هر قطر به کل رسوبات ورودی می‌باشد. با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌شود که تا قطر ۱۲۰ میکرومتر نسبت وزنی ذرات در هر قطری نسبت به مجموع وزن ذرات در مقطع خروجی زیاد می‌شود که دلیل آن افزایش قطر ذرات و به تبع آن افزایش نسبت وزنی ذرات می‌باشد. با افزایش قطر از ۱۲۰ میکرومتر تا ۲۵۰ میکرومتر این روند نزولی می‌باشد که می‌توان دلیل آن را در ته‌نشینی ذرات در این قطرها و کاهش تعداد ذرات در خروجی دانست.

در ادامه با کاهش نسبت وزنی ذرات این مقدار به تدریج به صفر نزدیک شده و همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، نسبت وزنی ذرات در خروجی حوضچه در قطرهای بالاتر از ۲۵۰ میکرومتر برابر صفر می‌شود که این مطلب نشان دهنده این موضوع می‌باشد که راندمان تله اندازی حوضچه برای ذرات با قطرهای بالاتر از ۲۵۰ میکرومتر برابر ۱۰۰ درصد می‌باشد.

مطابق شکل (۳) پس از وارد نمودن نتایج عددی و مقایسه آن با کار آزمایشگاهی و نتایج عددی Sammarrae و همکاران [۱۱]، مشاهده می‌شود که مدل حاضر دارای دقتی مناسب است. نمودار راندمان تله اندازی رسوب برای مدل Sammarrae و همکاران [۱۱] و حوضچه مدل شده نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در کل دو مدل دارای تطابق مناسبی هستند.



شکل ۱- ضریب C_D در مقابل عدد رینولدز برای ذرات کروی
شکل [۲۰]

می‌توان با تقسیم نمودار ارائه شده در شکل (۱) به اجزاء کوچک‌تر و استخراج معادله خط به دست آمده تحت این شرایط، نمودار را به برنامه شبیه‌سازی معرفی کرده و در اعداد رینولدز مختلف از مقادیر نظیر C_D استفاده نمود.

۳- صحت‌سنجی مدل

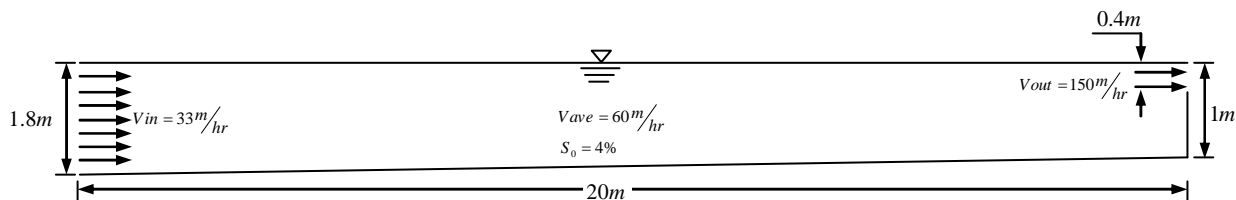
در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه ناتینگهام انگلیس مدل یک حوضچه ته‌نشینی توسط Sammarrae و همکاران [۱۱] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. این مدل دارای طول ۲۰ متر، عرض ۳ متر و خروجی به عمق ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین این کار آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار FLUENT 6.3 مدل شد و نتایج آن در قالب مقاله‌ای به چاپ رسید و نتایجی مانند کانتور سرعت ذرات و غلظت ذرات مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت‌سنجی مدل در روند رسوبگذاری و مدل کردن حرکت ذرات رسوب، مدلی مشابه مدل Sammarrae و همکاران [۱۱]، اجرا شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. شیب کف حوضچه در این مدل برابر ۰.۴٪ بوده که دبی ۶۰ مترمکعب در ساعت در واحد عرض از آن عبور داده شد.

ورودی در این مدل تمام دیواره سمت چپ بوده و ارتفاع خروجی آن ۰/۴ متر می‌باشد. عمق حوضچه در مقطع خروجی برابر ۱ متر است که با توجه به شیب کف حوضچه و طول آن، عمق ورودی برابر ۱/۸ متر بدست می‌آید. ابعاد و هندسه کلی این مدل در شکل (۲) ارائه شده است.

ذرات در این مدل بر اساس قطر در ۱۳ کلاس طبقه‌بندی شده‌اند. شکل ذرات رسوب کروی در نظر گرفته شد. این طبقه‌بندی براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده از آب خام^۱ با استفاده از روش پراش لیزر^۲ استوار بود [۱۰]. در این مدل جرم حجمی آب و ذرات به ترتیب 998.2 kg/m^3 و 2066 kg/m^3

1- Raw water

2- Laser diffraction technique



شکل ۲- هندسه مدل Sammarrae و همکاران [۱۱] به منظور صحت سنجی حرکت رسوب

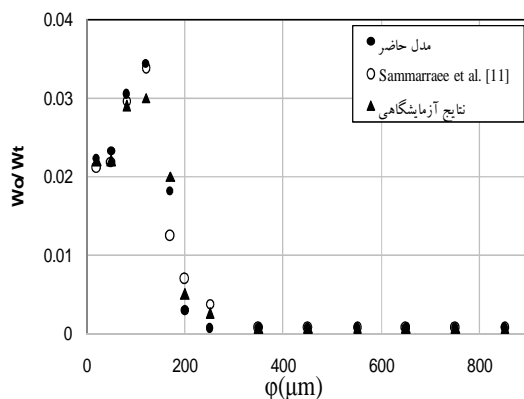
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این پژوهش ابتدا الگوی جریان داخل حوضچه ته‌نشینی بررسی و سپس خطوط جریان استخراج شده با نتایج Tamayol و همکاران [۲۱] مقایسه شد (شکل (۵)). آنگاه با تزریق ذرات رسوب با قطرهای مجزا به داخل حوضچه ته‌نشینی و تحلیل حرکت این ذرات به صورت لاگرانژی به تحلیل نحوه حرکت ذرات رسوب درون حوضچه ته‌نشینی پرداخته شد. همان‌طور که در این شکل مشخص است نتایج از انطباق مناسبی برخوردار هستند. در این شکل، ورودی در حد فاصل ۱/۴ تا ۲/۸ متر نسبت به کف حوضچه ترسیب قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود طول نواحی چرخشی ایجاد شده در این دو حالت تقریباً یکسان و در حدود $x/h = 3/6$ می‌باشد که در آن x اشاره به راستای طولی نموده و h عمق کلی حوضچه در ورودی می‌باشد. با بررسی خطوط جریان مشاهده می‌شود که در ابتدای حوضچه، جریان دارای الگوی چرخشی مشابه الگوی پله می‌باشد. در ادامه‌ی حوضچه خطوط جریان بصورت موازی در می‌آیند اما تراکم خطوط از بالا به پایین کم می‌شود که این موضوع مبین کاهش سرعت جریان در اعماق پایین‌تر است.

۵-۱- تحلیل مدل برای بررسی دانه‌بندی ذرات در خروجی

ته‌نشینی

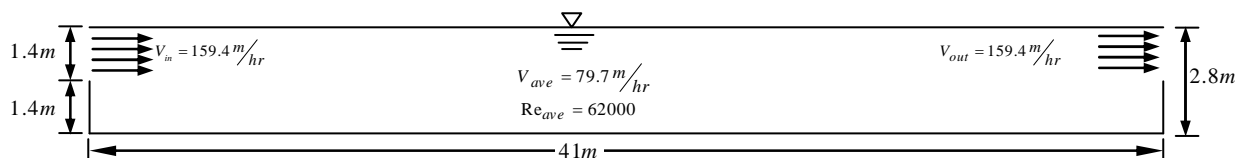
به منظور بررسی وضعیت ته‌نشینی ذرات و توان تله‌اندازی آن‌ها در حوضچه، ذرات رسوب با قطرهای مختلف در ورودی آن به صورت یکنواخت وارد می‌شوند.



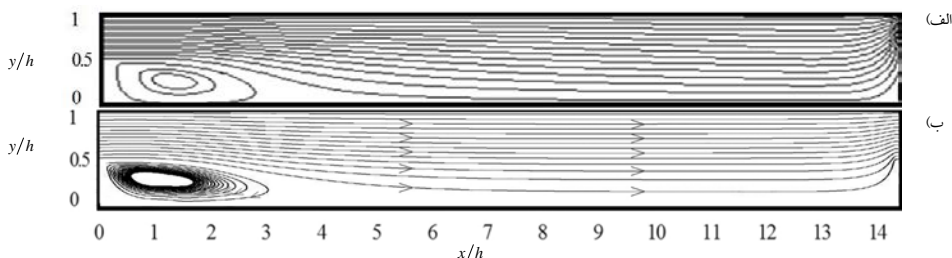
شکل ۳- مقایسه دانه‌بندی ذرات در خروجی حوضچه با نتایج آزمایشگاهی

۴- معرفی هندسه مدل آزمایشگاهی

ابعاد و هندسه کلی مدل این تحقیق برگرفته از مدل آزمایشگاهی موجود در دانشگاه Karlsruhe در آلمان است که توسط Stamou [۱۲] و Tamayol و همکاران [۲۱] استفاده شده است. مدل شامل یک حوضچه طولی به طول ۴۱ متر، ارتفاع کل ۲/۸ متر و ارتفاع ورودی و خروجی ۱/۴ متر می‌باشد (شکل (۴)). مقادیر پیشنهادی برای سرعت حرکت آب داخل حوضچه ترسیب، مقداری کمتر از ۸ سانتیمتر بر ثانیه پیشنهاد شده است [۲۲]. در این تحقیق سرعت جریان براساس عدد رینولدز متوسط ۶۲۰۰۰ محاسبه گردید. لذا با در نظر گرفتن عمق ورودی، سرعت جریان در این مقطع ۴/۴ سانتیمتر بر ثانیه محاسبه شد. در این مدل پس از استخراج مشخصات جریان، ذرات رسوب به مدل وارد شده و با گذشت زمان، ذرات در هر گام ردیابی شده و با توجه به مشخصات جریان در هر نقطه، موقعیت ذره در گام زمانی بعدی پیش‌بینی می‌شود. لازم به ذکر است که در بخش لاگرانژی مدل، هر ذره از ماهیتی مستقل برخوردار بوده و مدل کامپیوتری به هر ذره بخشی از ماتریس محاسباتی را اختصاص می‌دهد. در نهایت با توجه به نحوه حرکت ذرات مدل شده می‌توان به الگویی از انتشار ذرات درون حوضچه ته‌نشینی رسید.



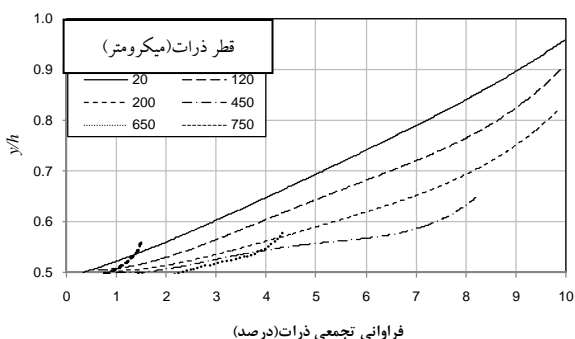
شکل ۴- هندسه مدل مورد مطالعه



شکل ۵- خطوط جریان الف) نتایج مرجع [۲۱] ب) نتایج محاسباتی کار حاضر

مشخص نمود که با افزایش ارتفاع در مقطع خروجی و در هر فاصله از خروجی تا کف حوضچه، چند درصد از ذرات با هر قطری نسبت به مجموع ذرات خروجی، از حوضچه ته‌نشینی خارج می‌شوند. به عنوان مثال میزان خروج ذرات با قطر ۲۰۰ میکرومتر تا ارتفاع ۰/۶ برابر ۵/۵ و تا ارتفاع ۰/۷ برابر ۸ درصد از کل ذرات خارج شده از حوضچه می‌باشد و با توجه به این که در کل ۹/۸ درصد ذرات در مقطع خروجی حوضچه شامل دانه‌های با قطر ۲۰۰ میکرومتر می‌باشند (که حداکثر از ارتفاع $y/h \leq 0.83$ می‌توانند عبور کنند) می‌توان به کمک برون‌یابی و تعمیم تعداد ذرات با این قطر مشخص به ۱۰۰ درصد، مشخص نمود که درصد ذرات عبوری از ارتفاع $y/h \leq 0.6$ و $y/h \leq 0.7$ نسبت به تعداد ذرات با قطر ۲۰۰ میکرومتر به ترتیب برابر ۵۶/۱ و ۸۱/۶ درصد می‌باشد.

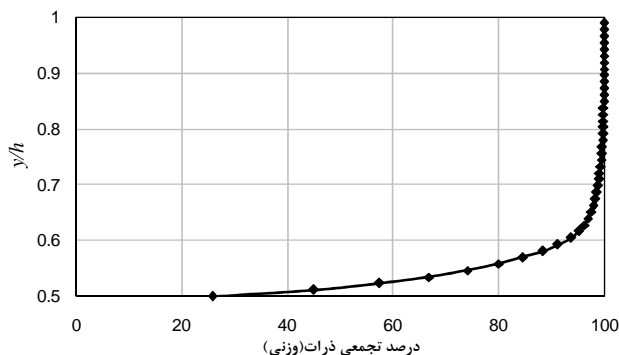
از قابلیت‌های این مدل، ارائه گستره قطر ذرات در هر مقطع و بررسی قطر ذرات در هر عمقی از حوضچه ته‌نشینی می‌باشد.



شکل ۶- فراوانی تجمعی ذرات در خروجی حوضچه

در این شبیه‌سازی، فرض می‌شود که هر ذره علاوه بر سرعتی که جریان در دو جهت افقی و قائم به آن دیکته می‌کند، دارای سرعت سقوط بدست آمده از معادله دینامیکی حاکم بر ذره می‌باشد. نخست مقطع خروجی حوضچه ته‌نشینی به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده و فرض می‌شود آب خام که دارای توزیع یکنواختی از ذرات معلق می‌باشد از ورودی مخزن که در مقطع $x/h = 0$ و $0.5 \leq y/h \leq 1$ واقع شده، وارد حوضچه شود. آنگاه با توجه به شدت بار رسوبی آب، تعداد ذراتی که از هر بازه در واحد زمان عبور می‌کند محاسبه می‌شود. سپس تعدادی از ذرات معلق طی فرآیند انتقال، تله افتادگی و ته‌نشینی، خود را به مقطع خروجی که در موقعیت $x/h = 14.6$ و $0.5 \leq y/h \leq 1$ قرار دارد می‌رسانند. با توجه به مدل‌سازی حرکت ذرات رسوب به صورت لاگرانژی در این مطالعه، می‌توان هر ذره را به طور مستقل ردیابی کرده و موقعیت آن را در هر لحظه مشخص نمود. لذا با بررسی تعداد ذرات عبوری از مقطع خروجی حوضچه ته‌نشینی، می‌توان تعداد ذراتی که از این مقطع با هر قطری و از هر تراز عبور می‌کنند را به دست آورد.

فراوانی ذرات در خروجی به تفکیک قطر ذرات، نسبت به ارتفاع برای ۶ نمونه از ذرات در شکل (۶) ارائه گردیده است. این نمودار با توجه به تعداد کل ذرات خارج شده از حوضچه ته‌نشینی بدون بعد شده است. محور افقی نمودار نشان دهنده فراوانی تجمعی ذرات خارج شده از حوضچه می‌باشد. از کل ذرات موجود در مقطع خروجی، ۱۰ درصد ذرات دارای قطر ۲۰ میکرومتر بوده و ۴ درصد ۶۵۰ میکرومتر هستند که این ذرات به تفکیک قطر و به صورت جداگانه وارد حوضچه می‌شوند. یعنی با افزایش قطر درصد ذرات خارج شده از حوضچه کاهش می‌یابد که این امر گویای افزایش راندمان تله‌اندازی رسوب با افزایش قطر ذرات می‌باشد. از طرفی با بررسی این شکل می‌توان

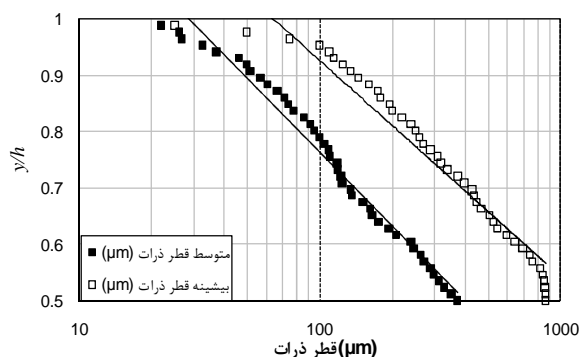


شکل ۸- توزیع وزنی تجمعی ذرات در خروجی

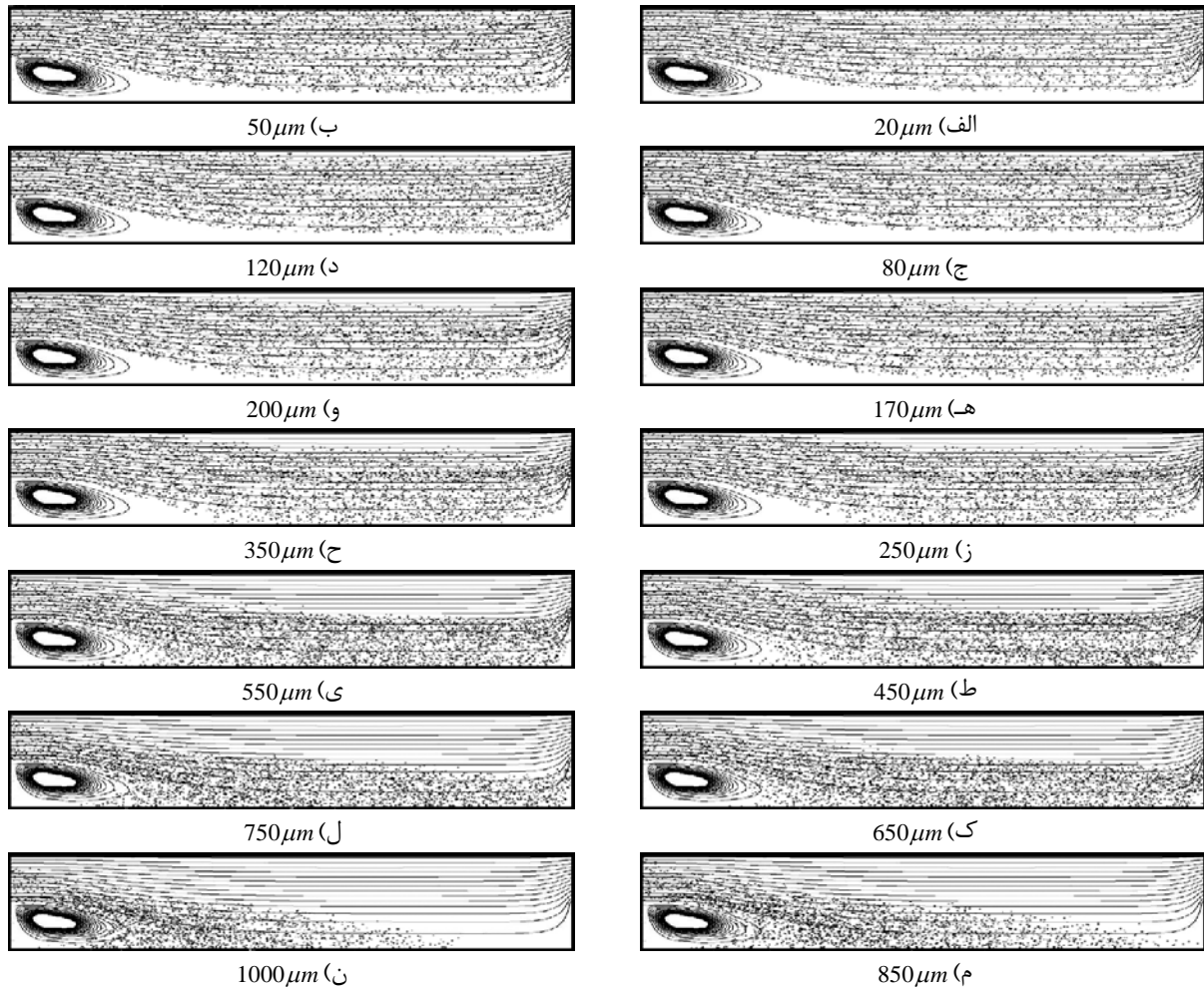
همان گونه که در این اشکال مشاهده می‌شود با افزایش قطر ذرات، دانه‌های رسوب از ترازهای پایین‌تری از مقطع خروجی عبور می‌کنند. به عنوان مثال، ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر از تمام مقطع خروجی کانال خارج می‌شوند، در حالی که با توجه به شکل (۶) ذرات با قطر ۷۵۰ میکرومتر حداکثر می‌توانند از $y/h = 0.58$ خارج شوند. لذا با ترکیب ذرات با قطرهای مختلف، در مجموع وزن و قطر ذرات در کف کانال خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به این که مقدار وزنی ذرات، مجموع حاصل ضرب تعداد ذرات در وزن هر ذره می‌باشد و خروج ذرات با قطر و تعداد بیشتر از اعماق پایین‌تر رخ می‌دهد، تمرکز وزنی در نواحی نزدیک به کف خروجی بسیار بیشتر می‌باشد و همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، حدود ۹۰ درصد رسوبات خارج شده از حوضچه، از ۲۰ درصد پایین مقطع خروجی، خارج می‌شوند.

ذرات رسوب به صورت تصادفی و با توزیع نرمال در ترازهای مختلفی از مقطع ورودی به حوضچه وارد می‌شوند. در روند حرکت ذرات، با توجه به قطر تعدادی از آنها ته‌نشین شده و تعداد دیگری از حوضچه خارج می‌شوند. این روند پس از مدتی به پایداری رسیده و تعداد ذرات خروجی از حوضچه در بازه‌های زمانی مشخص به مقدار ثابتی می‌رسد که در هر حال کسری از تعداد ذرات ورودی می‌باشد. شکل (۹) حالت گسترش یافته و پایدار توزیع ذرات را برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل خطوط جریان انتظار می‌رود که در صورت ورود ذره‌ای فرضی با قطر صفر از هر عمقی از ورودی حوضچه، این ذره مسیر خطوط جریان با منشأ مقطع ورودی را طی کرده و از خروجی حوضچه خارج شود. لذا راندمان تله‌اندازی برای چنین ذره‌ای صفر درصد می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای ذرات با قطر بسیار کوچک (۲۰ میکرومتر)، چنین فرآیندی رخ می‌دهد.

شکل (۷) گستره قطری ذرات را در خروجی حوضچه با توجه به ارتفاع در این مقطع ارائه می‌نماید. همان طور که انتظار می‌رود، در ارتفاعات کمتر روی دریاچه خروجی، قطر ذراتی که می‌توانند از این مقطع عبور کنند بیشتر می‌شود. با اطلاع از نحوه خروج ذرات با دانه‌بندی‌های مختلف در مقطع خروجی، می‌توان برای افزایش راندمان تله‌اندازی، کنترل حداکثر قطر ذرات خارج شده از حوضچه و طراحی بهینه حوضچه ته‌نشینی تمهیداتی را در نظر گرفت. در این شکل علاوه بر دانه‌بندی متوسط قطر ذرات در خروجی، بیشینه قطر ذرات که توانایی خروج از حوضچه را دارند نسبت به ارتفاع، آورده شده است. به کمک این نمودار می‌توان قطر بزرگترین ذراتی را که در هر ارتفاع توانایی خروج دارند پیش‌بینی کرد. به عنوان مثال می‌توان گفت که ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر می‌توانند از تمام عمق مقطع خروجی خارج شوند در حالی که ذرات با قطر ۴۰۰ میکرومتر تنها می‌توانند از $y/h \leq 0.7$ خارج شوند که این مفهوم با توجه به نمودار مربوط به بیشینه قطر ذرات که می‌توانند از هر تراز خارج شوند مشخص می‌شود. با توجه به این که در ترازهای پایین‌تر در مقطع خروجی، گستره بیشتری از ذرات خارج می‌شوند لذا می‌توان به طور متوسط قطر ذراتی را که در هر تراز از حوضچه ته‌نشینی خارج می‌شوند به دست آورد. به عنوان مثال در تراز ۰/۷ که بیشینه قطر ۴۰۰ میکرومتر توانایی خروج از حوضچه را دارد، توأمأ ذرات با قطر کوچک‌تر نیز می‌توانند عبور کنند که قطر ذرات عبوری از این تراز به طور متوسط برابر ۱۵۰ میکرومتر می‌باشد. شکل (۸) توزیع وزنی ذرات را به صورت تجمعی در مقطع خروجی حوضچه ته‌نشینی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ترازهای پایین‌تر، درصد وزنی بیشتری از ذرات از حوضچه خارج می‌شوند؛ لذا می‌توان چنین برداشت کرد که در ترازهای پایین‌تر، غلظت رسوبات بالاتر می‌باشد. این پدیده با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) قابل تفسیر است.



شکل ۷- گستره قطری ذرات در خروجی



شکل ۹- وضعیت گسترش یافته ذرات در حوضچه ترسیب در حالت پایدار

ذرات با قطرهای مختلف متفاوت است. از طرفی، میزان سرعت پیشروی و گسترش ذرات ارتباطی معکوس با قطر ذرات دارد به طوری که با افزایش قطر ذرات رسوب، حرکت آنها به جلو کاهش یافته و در مقابل سرعت ته‌نشینی ذرات افزایش می‌یابد.

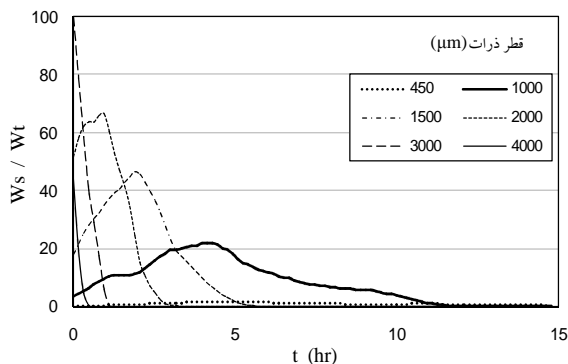
همان طور که در شکل (۹) به وضوح مشاهده می‌شود تراکم خطوط جریان در سطح حوضچه نسبت به ترازهای پایین‌تر آن بیشتر است که این امر نشان دهنده کاهش سرعت افقی جریان در ترازهای پایین نسبت به نواحی بالاتر حوضچه است. از این رو این ذرات در زمان طولانی‌تری به انتهای حوضچه می‌رسند.

۵-۲- بررسی دانه‌بندی رسوبات در کف حوضچه ته‌نشینی

برای تعیین نحوه ته‌نشین شدن ذرات، مقداری رسوب در ۲۰ رده قطری از ۲۰ تا ۵۰۰۰ میکرومتر و به صورت مجزا برای هر قطر از ذرات به حوضچه تزریق شد و پس از رسیدن به حالت تعادل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تعداد ذرات ته‌نشین شده، می‌توان وضعیت قطر ذرات را در کف حوضچه به دست

یعنی ذرات از یک سمت وارد شده و بدون به تله افتادن در نواحی چرخشی و یا ته‌نشینی، از سمت دیگر حوضچه خارج می‌شوند. با توجه به نتایج بدست آمده، این روند تا قطر ۲۰۰ میکرومتر ادامه دارد. با ادامه افزایش قطر، به تدریج ذرات از مسیر خطوط جریان خارج شده و به سمت پایین کشیده می‌شوند. این پدیده در قطرهای ۲۵۰ میکرومتر به بالا در شکل (۹) قابل مشاهده است. با ادامه افزایش قطر ذرات به تدریج سرعت سقوط بیشتر می‌شود، به گونه‌ای که ذرات رسوبی در نواحی ابتدایی‌تر، از خطوط جریان جدا شده و وارد ناحیه چرخشی ابتدای حوضچه می‌شوند. این پدیده را می‌توان در قطرهای بالاتر از ۴۵۰ میکرومتر مشاهده کرد.

با دقت در این اشکال مشاهده می‌شود که ذرات با قطر مشخص محدوده خاصی از مخزن را به خود اختصاص می‌دهند. به عبارت دیگر برای هر قطری از ذرات یک خط پوش قابل تشخیص است که در بالای آن هیچ ذره‌ای از آن قطر قرار ندارد و یا به علت تبعیت از خطوط جریان در برخی نواحی غلظت



شکل ۱۱- تعداد ذرات ته‌نشین شده در طول حوضچه

لذا بیشینه تعداد ذرات رسوب کرده در این گستره قطری، در ناحیه بین فضای مرده حوضچه و خطوط موازی جریان قرار دارد. با توجه به این که با افزایش قطر ذرات، جرم ذرات نیز افزایش می‌یابد، می‌توان مشاهده نمود که به تدریج اثرات ناحیه چرخشی نیز روی روند ته‌نشینی کم شده و از حدود ۳۰۰۰ میکرومتر تقریباً به صفر می‌رسد. این واقعیت را می‌توان با توجه به شکل (۱۱) به وضوح مشاهده کرد؛ چرا که در قطرهای بالای ۳۰۰۰ میکرومتر، قله نمودار به ابتدای حوضچه منتقل شده و از اثرات چرخشی پیروی نمی‌کند. در این شکل w_p/w_r نشان دهنده نسبت وزن رسوبات ته‌نشین شده در هر قطر به کل رسوبات ورودی می‌باشد. با توجه به این که در قطرهای کمتر، اکثر ذرات از حوضچه خارج می‌شود، لذا تعداد بسیار کمی از ذرات ته‌نشین می‌شود. بنابراین نمودار ذرات با قطرهای کم، به صفر نزدیک است.

۵-۳- برآورد راندمان تله‌اندازی حوضچه ته‌نشینی

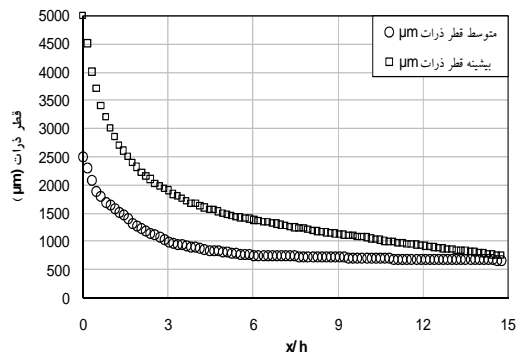
با داشتن تعداد ذرات خروجی از حوضچه، می‌توان راندمان تله‌اندازی حوضچه ته‌نشینی را با توجه به دانه‌بندی ذرات در ورودی به دست آورد. مقدار بار رسوبی ته‌نشین شده در این مطالعه تحت عنوان راندمان تله‌اندازی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه گردید [۵]:

$$Te = \frac{S_i - S_o}{S_i} \times 100 \quad (6)$$

که در این رابطه Te راندمان تله‌اندازی و S_i و S_o به ترتیب میزان غلظت متوسط رسوبات ورودی و خروجی در واحد زمان از حوضچه ته‌نشینی می‌باشد.

آورد. همچنین با توجه به داده‌های حاصل از برنامه می‌توان بیشینه قطری را که در هر فاصله از ابتدای حوضچه ته‌نشینی می‌تواند ته‌نشین شود، پیش‌بینی کرد. شکل (۱۰) وضعیت قطر ذرات را در کف حوضچه و در طول حوضچه نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با دور شدن از ابتدای حوضچه متوسط قطر ذرات کاهش می‌یابد. باید توجه نمود که ذرات درشت دانه مسافتی را به صورت معلق بدون ته‌نشینی می‌توانند در طول حوضچه بپیمایند. به کمک این شکل می‌توان مشاهده نمود که به عنوان مثال ذرات با قطر ۱۵۰۰ میکرومتر حداکثر تا فاصله $x/h \approx 6$ مشاهده می‌شوند و می‌توان انتظار داشت که ادامه حوضچه ته‌نشینی اثری از ذرات با این قطر مشاهده نشود. باید در نظر داشت که در همین فاصله از ابتدای حوضچه، ذرات با قطرهای کمتر از ۱۵۰۰ میکرومتر نیز می‌توانند ته‌نشین شوند. لذا میانگین قطر ذرات ته‌نشین شده در این فاصله مقداری کمتر از ۱۵۰۰ میکرومتر و برابر ۷۵۰ میکرومتر می‌باشد.

برای تعیین نحوه پخش ذرات در کف حوضچه، ذرات در ۲۰ رده قطری و به صورت مجزا به حوضچه تزریق شدند. شکل (۱۱) نشان دهنده درصد وزنی ذرات ته‌نشین شده در این مدت و در فواصل صفر تا ۱۴/۶ h است. در گستره ۲۰ تا ۸۵۰ میکرومتر روند ته‌نشینی نسبتاً یکنواخت بوده و ذرات در تمام طول حوضچه پخش شده‌اند. با افزایش قطر تا ۲۵۰۰ میکرومتر، روند ته‌نشینی ذرات به تدریج به سمت ابتدای حوضچه متمایل می‌شود؛ اما در این گستره قطری می‌توان مشاهده کرد که قله‌ای که نشان از بیشینه تعداد ذرات رسوب کرده در هر قطر دارد، در حد فاصل ۱ تا ۳ برابر ارتفاع بوجود می‌آید. می‌توان چنین برداشت کرد که با افزایش قطر در گستره تقریبی ۸۵۰ تا ۲۵۰۰ میکرومتر، با وجود این که ذرات تمایل به ته‌نشینی در ابتدای حوضچه دارند اما روند حرکت و ته‌نشینی آن‌ها متأثر از ناحیه چرخشی ابتدای حوضچه که در شکل (۵) قابل مشاهده است نیز می‌باشد.



شکل ۱۰- گستره قطری ذرات ته‌نشین شده در طول حوضچه

ذکر شده، تقریباً تمامی ذرات با قطر بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر به تله می‌افتند. از طرفی با استفاده از منحنی برازش داده شده بر اطلاعات حاصل از مدل برآوردی از راندمان تله‌اندازی در گستره ۲۰ تا ۸۵۰ میکرومتر پیش‌بینی شده است.

۷- مراجع

- [1] Larsen, P., "On the Hydraulics of Rectangular Settling Basins", Report No. 1001, Department of Water Research Engineering, Lund Institute of Technology, 1977.
- [2] Shamber, D. R., Larock, B. E., "Numerical Analysis of Flow in Sedimentation Basins", Journal of Hydraulic Division, 1981, 107 (HY5), 575-591.
- [3] Long, F., Xu, N., Ke, X., Shi, H., "Numerical Simulation of Secondary Sedimentation Tank for Urban Wastewater", Chemical Engineering Journal, 2007, 38, 425-433.
- [4] McCorquodale, J. A., Zhou, S., "Effects of Hydraulic and Solids Loading on Clarifier Performance", Journal of Hydraulic Research, 1993, 31, 461-477.

[۵] سجادی، م.، شفاعی‌بجستان، م.، بینا، م.، "ارزیابی مدل‌های طراحی حوضچه‌های رسوبگیر آبیاری"، نشریه آب و خاک، ۲۰۰۹، ۲۳ (۳)، ۱۱۰-۱۲۱.

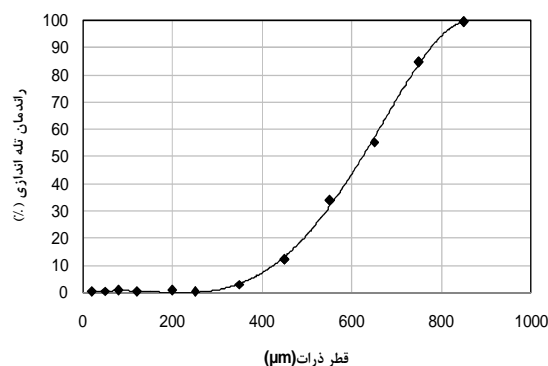
[۶] خادمی، م.، امید، م. ح.، هورفر، ع.، "بررسی اثر تیغه هدایت کننده بر راندمان تله‌اندازی حوضچه‌های رسوبگیر با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی"، مجله هیدرولیک، ۱۳۸۶، شماره بهار، ۱۱-۲۴.

[۷] شفاعی‌بجستان، م.، خمینی‌بزاز، م.، "بررسی توزیع طولی و عمقی غلظت و دانه‌بندی رسوب معلق در کانال‌های آبیاری"، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان آب و برق خوزستان، ۱۳۸۷.

- [8] Maxey, M. R., "On the Advection of Apherical and Non-Spherical Particles in a Non-Uniform Flow", Philosophy Transaction Royal Society London Academy, 1990, 333, 289-307.
- [9] Nielsen, P., "Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport", World Scientific, Singapore, 1992, pp 324.
- [10] Stovin, V. R., Saul, A. J., "Computational Fluid Dynamics and the Design of Sewage Storage Chambers". J.CIWEM, 14~21, 103-110, 2000.
- [11] Al-Sammarraee, M., Chan, A., Salim, S. M., Mahabaleswar, U. S., "Large-Eddy

شکل (۱۲) راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب را با توجه به قطر آن‌ها نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با کاهش قطر ذرات به ۲۵۰ میکرومتر، شیب نمودار کم می‌شود.

به عبارت دیگر، در قطرهای کمتر از ۲۵۰ میکرومتر، در حوضچه‌ای با مشخصات ذکر شده، راندمان تله‌اندازی رسوب تغییر چندانی نمی‌کند و به ۰٪ محدود می‌شود. از طرفی با برازش منحنی بر این داده‌ها، می‌توان مشاهده کرد که در قطرهای بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر راندمان تله‌اندازی حوضچه به ۱۰۰ درصد می‌رسد و این موضوع در هماهنگی کامل با شکل (۹) می‌باشد.



شکل ۱۲- راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مطالعه روی حوضچه ته‌نشینی طولی در یک مدل دو بعدی اولری- لاگرانژی انجام شد. پس از استخراج خطوط جریان به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، ذرات رسوب در ورودی با توزیعی یکنواخت و به صورت دانه‌ای و مستقل از یکدیگر با حرکتی لاگرانژی وارد حوضچه شده و ادامه حرکت آن‌ها با تبعیت از اثرات جریان سیال، وزن ذرات، نیروهای سبک‌کنندگی و رانش، درون حوضچه تصویر شد. در این مقاله با استفاده از روش یاد شده، دانه‌بندی رسوبات در کف و خروجی حوضچه مورد بررسی قرار گرفت و رسوبات به تفکیک قطر ذرات ته‌نشین شده و همچنین درصد ذرات رسوبی در هر رده قطری بر اساس فاصله از شروع حوضچه بررسی شد. همچنین دانه‌بندی ذرات خروجی از حوضچه و درصد ذرات هر رده قطری نیز براساس ارتفاع از کف کانال خروجی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با استفاده از برون‌یابی تابع حاصل از راندمان تله‌اندازی رسوب، مشخص گردید که در حوضچه‌ای با شرایط

- University of Technology, Tehran, Iran, 2003.
- [17] Sagaut, P., "Large Eddy Simulation for Incompressible Flows", Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [18] Salvetti, M. V., "Investigation of the Effect of Numerical Discretization and Physical Modeling in Reduced-Order Simulation of Turbulent Flows", PhD Thesis in Aerospace Engineering, University of Pisa, 2001.
- [19] Rubey, W. W., "Equilibrium-Conditions in Debris-Laden Streams", Transactions of American Geophysics Union, 1933.
- [20] Vanoni, V. A., "Sedimentation Engineering", ASCE Task Committee, Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of Hydraulic Division, 2006.
- [21] Tamayol, A., Firoozabadi B., Ahmadi, G., "Determination of Settling Tanks Performance Using an Eulerian Lagrangian Method", Journal of Applied Fluid Mechanics, 2008, 1, (1), 43-54.
- [22] DE Clercq, B., "Computational Fluid Dynamics of Settling Tanks: Development of Experiments and Rheological, Settling, and Scraper Sub-Models", PhD Thesis in Applied Biological Sciences, University of Gent, 2003.
- Simulations of Particle Sedimentation in a Longitudinal Sedimentation Basin of a Water Treatment Plant. Part I: Particle Settling Performance", Chemical Engineering Journal, 2009, 152, 307-314.
- [12] Stamou, A., "Optimizing the Design of Secondary Clarifiers Using Mathematical Models", Proceedings of the 4th Int. Conf. on Water Pollution: Modeling, Measuring and Prediction, Bled, pp. 681-690, 1997.
- [13] Imam, E., McCorquodale, J. A., Bewtra, J. K., "Numerical Modeling of Sedimentation Tanks", Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 109 (12), 1740- 1754.
- [14] Adams, E. W., Rodi, W., "Modeling Flow and Mixing in Sedimentation Tanks", Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (7), 895-913.
- [15] Stamou, A., Katsiris, I., Georgiadis, S., Kanellopoulou, S., Tzoumerkas, F., Xenos, D., "Improving the Efficiency of Existing Water Process Tanks Using Flow Through Curves-FTCs- and Mathematical Models", International Conference on Environmental Science and Technology, Syros, Greece, 2001.
- [16] Ashjari, M. A., "Numerical Modeling of Settling Tanks", MSc Thesis, Sharif

آوردند. Adams و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل آشفتنگی $k-\epsilon$ جریان را در حوضچه ترسیب مدل‌سازی کردند. در این زمینه Stamou و همکاران [۱۵] با استفاده از مدل آشفتنگی $k-\epsilon$ و اسکیم QUICK جریان را در حوضچه ترسیب مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند و با استفاده از این مدل بافل‌هایی را درون حوضچه‌های ته‌نشینی مدل کردند که منجر به استخراج نتایج مناسبی گردید. آن‌ها برای پیش‌بینی کارایی حوضچه‌های ته‌نشینی از FTC^۱ استفاده کردند. Ashjari [۱۶] با استفاده از روش $k-\epsilon$ غیرخطی و FTC جریان را درون حوضچه تحلیل کرده و کارایی حوضچه‌های ته‌نشینی را برآورد نمودند.

در این تحقیق، جریان درون حوضچه‌های ته‌نشینی با استفاده از یک مدل محاسباتی دو بعدی که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شده است مطالعه می‌شود. برای این امر نخست با استفاده از مدل عددی حجم محدود با الگوریتم SIMPLE و به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته، جریان داخل حوضچه مدل شده و خطوط جریان استخراج می‌شود. سپس با تزریق ذرات رسوب که دارای چگالی و قطرهای مشخصی هستند و به کمک فرض حرکت لاگرانژی مسیر حرکت آن‌ها به دست می‌آید و الگوی جریان، نسبت دانه‌بندی ذرات و وزن ذرات در کف و خروجی حوضچه استخراج می‌شود. در این تحقیق مدل‌سازی با فرض پایداری و یکنواخت بودن جریان انجام شده است.

۲- معادلات حاکم

تحلیل جریان رسوب درون حوضچه‌های ته‌نشینی به دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول با استفاده از دیدگاه اولری به شبیه‌سازی جریان پرداخته می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال در این بخش، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند که به معادلات ناویر-استوکس معروفند. معادلات حاکم مورد استفاده در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) با استفاده از متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر-استوکس در فضای فیزیکی به دست می‌آیند. اغتشاش در جریان در اثر ناپایداری جریان‌های آرام ایجاد می‌شود. در حالت کلی وجود ناپایداری در جریان سبب ایجاد ساختمان موجی شکل در جریان شده که می‌تواند انرژی جریان متوسط را جذب نماید. گردابه‌های بزرگ، انرژی اخذ شده از جریان متوسط را به تدریج به گردابه‌های کوچک منتقل نموده و سپس این انرژی به گرما تبدیل می‌شود.

سرعت و لزجت آشفتنگی، و مدل انتقال دهنده ذرات برای تعیین غلظت آن‌ها، شبیه‌سازی به کمک محاسبات دینامیک جریان نیز برای تحلیل انتقال ذرات رسوب با اندازه‌های مختلف استفاده شد. از این مدل برای برآورد اثرات پالایش رسوب در مسیر جریان استفاده شد، که می‌تواند اطلاعاتی را در مورد پخش، انتشار ذرات و نسبت ذرات رسوب نموده به کل ذرات در اختیار قرار دهد. اطلاعاتی از این دسته می‌تواند برای برآورد راندمان در روند رسوب‌گذاری استفاده شود. سجادی و شفاعی بجستان [۵] مدل‌هایی را برای طراحی حوضچه‌های ته‌نشینی مطالعه کرده و عملکرد آن‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی مورد ارزیابی قرار دادند.

خادمی و همکاران [۶] با روش آزمایشگاهی و عددی به بررسی اثر تیغه عمودی مستغرق بر راندمان تله‌اندازی در حوضچه‌های ته‌نشینی آبیاری پرداختند. آن‌ها نشان دادند که زمانی که جت وارد شده از کانال بالا دست، تغییرات شدید عرضی سرعت را در حوضچه به وجود می‌آورد، نصب تیغه در عمق استغراق به میزان ۱۵ درصد افزایش راندمان به میزان حداکثر ۸/۵ درصد را در پی دارد. شفاعی بجستان و خمینی بزاز [۷] اندازه‌گیری‌هایی را در کانالی بتنی به طول تقریبی ۲۰۰ متر با مقطع مستطیلی و عرض کف یک متر که توسط پمپاژ از رودخانه کارون تغذیه می‌شد، انجام دادند. برای تنظیم دبی ورودی، دریچه کشویی در ابتدای کانال نصب گردید و برای قرائت دبی از یک سر ریز مستطیلی لبه تیز استفاده شد. سرریز با استفاده از ورق گالوانیزه ساخته شد و در پائین دست دریچه کانال نصب گردید. در سال‌های اخیر از روش ردیابی ذرات با استفاده از مدل‌های اولری-لاگرانژی برای بررسی تله‌اندازی رسوبات استفاده شده است. Maxey [۸] در قسمت حرکت ذره در یک میدان جریان که در یک جریان آشفته ایجاد شده است از یک مدل لاگرانژی استفاده نموده در حالی که مدل جریان سلولی در آن، خود به وسیله یک دیدگاه اولری تولید شده است. همچنین Nielsen [۹] با استفاده از اصل روی‌هم‌گذاری، مسیر حرکت ذرات جامد و حباب را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که با تقریب خوبی می‌توان چنین کاری را در جریان‌های با شتاب کم در مقایسه با شتاب جاذبه g انجام داد. در این مورد می‌توان به کارهای Stovin و Saul [۱۰] و Sammarrae و همکاران [۱۱] نیز اشاره نمود. Stamou [۱۲]، بهینه‌سازی ابعاد و هندسه حوضچه‌های ترسیب را بررسی نمود. Imam و همکاران [۱۳] معادلات جریان را با فرض وجود گردابه‌های ثابت حل کردند و موفقیت‌هایی در زمینه پیش‌بینی مشخصات جریان بدست

و دومی براساس یک تحلیل اولری که به صورت عام در میدان جریان برقرار است حاصل می‌شود، مبنای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره می‌باشد. از آنجائی که تفاضل وزن مخصوص ذره و سیال مجاور آن منجر به نیروهایی می‌شود که ذره را از مسیر خطوط جریان منحرف می‌سازد، می‌توان ادعا نمود که استفاده از سرعت سقوط ذره به عنوان تفاضل سرعت‌های لاگرانژی و اولری دقیقاً منطبق بر واقعیت است. در روند تحلیل و مدل‌سازی حرکت ذرات رسوب، از تأثیر متقابل ذرات بر یکدیگر صرف‌نظر شده و نیروهای حاکم، شامل نیروهای مقاومت در برابر حرکت، سبک‌کنندگی و وزن ذرات می‌باشند. برای ذره در حال سقوط با فرض سقوط آزاد می‌توان از رابطه تعادل نیروها رابطه زیر را در نظر گرفت [۱۹]:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho_w A_p V_s^2 \quad (۴)$$

که در این رابطه F_D نیروی رانش، ρ_w جرم حجمی آب، C_D ضریب مقاومت در برابر حرکت، A_p سطح مقطع ذرات و V_s سرعت نسبی حرکت ذره در سیال است. با کاهش قطر دانه‌ها از نیروی رانش ذرات نیز کاسته شده و تبعیت ذرات از خطوط جریان بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که هر چه قطر ذرات رسوب کمتر باشد مقدار عدد رینولدز که با قطر ذرات رسوب ارتباط مستقیم دارد کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۵) با کاهش عدد رینولدز، به مقدار ضریب رانش (C_D) افزوده می‌شود. سرعت سقوطی که از رابطه استوکس بدست می‌آید، با قطر ذرات ارتباط مستقیم داشته و با ضریب رانش ارتباط معکوس دارد. در جریان با اعداد رینولدز کمتر از ۰/۱ ضریب C_D از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$C_D = \frac{24}{Re} : Re < 0.1 \quad (۵)$$

همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، این رابطه در اعداد رینولدز بزرگتر از ۰/۱ شروع به انحراف از نتایج آزمایشگاهی می‌کند. برای برآورد C_D در اعداد رینولدز بالاتر از ۰/۱، مبنای محاسبه نمودار ارائه شده در این شکل می‌باشد.

جهت به دست آوردن معادلات جریان برای گردابه‌های بزرگ لازم است در معادلات جریان سیال، گردابه‌های بزرگ را از گردابه‌های کوچک جدا کرده و سپس گردابه‌های کوچک را مدل نمود. روش‌های ریاضی متعددی وجود دارد که توسط آن می‌توان گردابه‌های بزرگ را از گردابه‌های کوچک جدا کرد. در کلیه این روش‌ها سعی می‌شود از طریق انتگرال‌گیری معادلات جریان برحسب ابعاد هندسی کوچک و یا فیلتر کردن معادلات جریان در فرکانس‌های بالا گردابه‌های کوچک جریان را حذف و یا جدا نمود [۱۷]. معادلات فیلتر شده ناویر-استوکس به صورت زیر می‌باشند [۱۸]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2(\nu + \nu_{sgs}) \frac{\partial \bar{S}_{ij}}{\partial x_j} \quad (۲)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (۳)$$

معادلات (۱) و (۲) به ترتیب معادلات پیوستگی و ممنوم بوده و معادله (۳) نشان دهنده نرخ کرنش زاویه‌ای است که در معادله (۲) ظاهر شده است. در این روابط u_i و u_j به ترتیب نشان دهنده سرعت در راستای افقی و قائم، ν و ρ به ترتیب لزجت سینماتیک و جرم حجمی سیال و ν_{sgs} لزجت مقیاس زیر شبکه^۱ است.

در بخش تحلیل حرکت لاگرانژی که به مطالعه نحوه حرکت ذرات رسوب اختصاص دارد، سرعت سقوط ذرات رسوب با فرض حرکت لاگرانژی و با استفاده از رابطه استوکس به دست می‌آید. فرض جریان لاگرانژی در حالتی که نسبت حجم ذرات کم باشد و حضور ذرات روی جریان اثر گذار نباشد فرض مناسبی می‌باشد [۱۱]. در مدل‌سازی حرکت رسوب درون حوضچه فرض می‌شود که ذرات رسوب دارای حرکت لاگرانژی تحت اثر سرعت جریان پایدار سیال در داخل حوضچه ته‌نشینی به اضافه سرعت ته‌نشینی ذرات تحت اثر معادله استوکس هستند. یعنی هر ذره علاوه بر سرعتی که جریان در دو جهت افقی و قائم به آن دیکته می‌کند، دارای سرعت سقوطی می‌باشد که از رابطه استوکس به دست می‌آید. در واقع باید گفت تفاضل سرعت مطلق ذره از سرعت جریان سیال که اولی از یک تحلیل لاگرانژی بر روی ذره

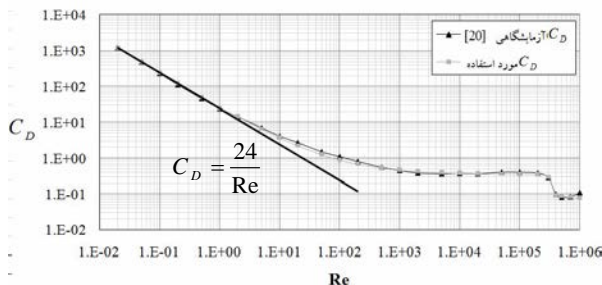
در نظر گرفته شد. در حوضچه‌های ته‌نشینی طولی، رسوبات به طور متناوب از حوضچه تخلیه می‌شوند، لذا تجمع ذرات در کف حوضچه مشکلی ایجاد نخواهد کرد [۳].

پس از اجرای مدل و تحلیل جریان داخل این حوضچه، ذرات رسوب به حوضچه تزریق شد. نتایج ارائه شده توسط Sammarrae و همکاران [۱۱] شامل نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی می‌باشد. در شکل (۳) مقایسه میان نتایج حاصله از برنامه کامپیوتری با داده‌های آزمایشگاهی، برای دانه‌بندی ذرات رسوب در خروجی حوضچه آورده شده است.

که در شکل (۳)، w_o/w_i نشان دهنده نسبت وزن رسوبات خروجی در هر قطر به کل رسوبات ورودی می‌باشد. با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌شود که تا قطر ۱۲۰ میکرومتر نسبت وزنی ذرات در هر قطری نسبت به مجموع وزن ذرات در مقطع خروجی زیاد می‌شود که دلیل آن افزایش قطر ذرات و به تبع آن افزایش نسبت وزنی ذرات می‌باشد. با افزایش قطر از ۱۲۰ میکرومتر تا ۲۵۰ میکرومتر این روند نزولی می‌باشد که می‌توان دلیل آن را در ته‌نشینی ذرات در این قطرها و کاهش تعداد ذرات در خروجی دانست.

در ادامه با کاهش نسبت وزنی ذرات این مقدار به تدریج به صفر نزدیک شده و همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، نسبت وزنی ذرات در خروجی حوضچه در قطرهای بالاتر از ۲۵۰ میکرومتر برابر صفر می‌شود که این مطلب نشان دهنده این موضوع می‌باشد که راندمان تله اندازی حوضچه برای ذرات با قطرهای بالاتر از ۲۵۰ میکرومتر برابر ۱۰۰ درصد می‌باشد.

مطابق شکل (۳) پس از وارد نمودن نتایج عددی و مقایسه آن با کار آزمایشگاهی و نتایج عددی Sammarrae و همکاران [۱۱]، مشاهده می‌شود که مدل حاضر دارای دقتی مناسب است. نمودار راندمان تله اندازی رسوب برای مدل Sammarrae و همکاران [۱۱] و حوضچه مدل شده نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در کل دو مدل دارای تطابق مناسبی هستند.



شکل ۱- ضریب C_D در مقابل عدد رینولدز برای ذرات کروی
شکل [۲۰]

می‌توان با تقسیم نمودار ارائه شده در شکل (۱) به اجزاء کوچک‌تر و استخراج معادله خط به دست آمده تحت این شرایط، نمودار را به برنامه شبیه‌سازی معرفی کرده و در اعداد رینولدز مختلف از مقادیر نظیر C_D استفاده نمود.

۳- صحت‌سنجی مدل

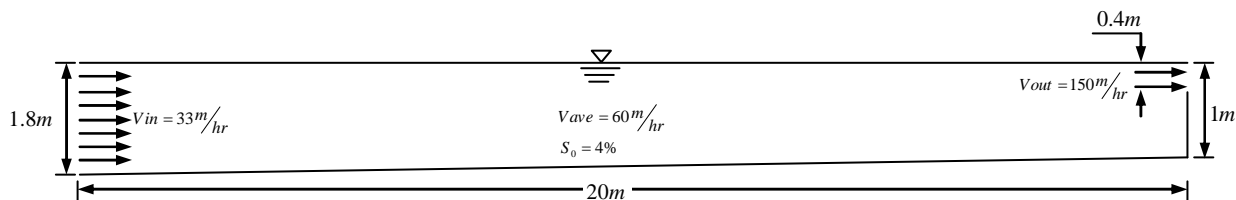
در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه ناتینگهام انگلیس مدل یک حوضچه ته‌نشینی توسط Sammarrae و همکاران [۱۱] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. این مدل دارای طول ۲۰ متر، عرض ۳ متر و خروجی به عمق ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین این کار آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار FLUENT 6.3 مدل شد و نتایج آن در قالب مقاله‌ای به چاپ رسید و نتایجی مانند کانتور سرعت ذرات و غلظت ذرات مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت‌سنجی مدل در روند رسوبگذاری و مدل کردن حرکت ذرات رسوب، مدلی مشابه مدل Sammarrae و همکاران [۱۱]، اجرا شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. شیب کف حوضچه در این مدل برابر ۰.۴٪ بوده که دبی ۶۰ مترمکعب در ساعت در واحد عرض از آن عبور داده شد.

ورودی در این مدل تمام دیواره سمت چپ بوده و ارتفاع خروجی آن ۰/۴ متر می‌باشد. عمق حوضچه در مقطع خروجی برابر ۱ متر است که با توجه به شیب کف حوضچه و طول آن، عمق ورودی برابر ۱/۸ متر بدست می‌آید. ابعاد و هندسه کلی این مدل در شکل (۲) ارائه شده است.

ذرات در این مدل بر اساس قطر در ۱۳ کلاس طبقه‌بندی شده‌اند. شکل ذرات رسوب کروی در نظر گرفته شد. این طبقه‌بندی براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده از آب خام^۱ با استفاده از روش پراش لیزر^۲ استوار بود [۱۰]. در این مدل جرم حجمی آب و ذرات به ترتیب 998.2 kg/m^3 و 2066 kg/m^3

1- Raw water

2- Laser diffraction technique



شکل ۲- هندسه مدل Sammarrae و همکاران [۱۱] به منظور صحت سنجی حرکت رسوب

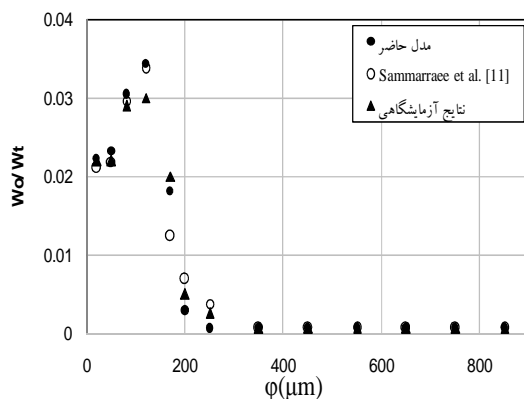
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این پژوهش ابتدا الگوی جریان داخل حوضچه ته‌نشینی بررسی و سپس خطوط جریان استخراج شده با نتایج Tamayol و همکاران [۲۱] مقایسه شد (شکل (۵)). آنگاه با تزریق ذرات رسوب با قطرهای مجزا به داخل حوضچه ته‌نشینی و تحلیل حرکت این ذرات به صورت لاگرانژی به تحلیل نحوه حرکت ذرات رسوب درون حوضچه ته‌نشینی پرداخته شد. همان‌طور که در این شکل مشخص است نتایج از انطباق مناسبی برخوردار هستند. در این شکل، ورودی در حد فاصل ۱/۴ تا ۲/۸ متر نسبت به کف حوضچه ترسیب قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود طول نواحی چرخشی ایجاد شده در این دو حالت تقریباً یکسان و در حدود $x/h = 3/6$ می‌باشد که در آن x اشاره به راستای طولی نموده و h عمق کلی حوضچه در ورودی می‌باشد. با بررسی خطوط جریان مشاهده می‌شود که در ابتدای حوضچه، جریان دارای الگوی چرخشی مشابه الگوی پله می‌باشد. در ادامه‌ی حوضچه خطوط جریان بصورت موازی در می‌آیند اما تراکم خطوط از بالا به پایین کم می‌شود که این موضوع مبین کاهش سرعت جریان در اعماق پایین‌تر است.

۵-۱- تحلیل مدل برای بررسی دانه‌بندی ذرات در خروجی

ته‌نشینی

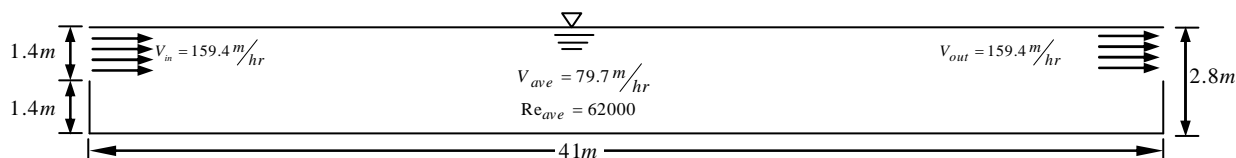
به منظور بررسی وضعیت ته‌نشینی ذرات و توان تله‌اندازی آن‌ها در حوضچه، ذرات رسوب با قطرهای مختلف در ورودی آن به صورت یکنواخت وارد می‌شوند.



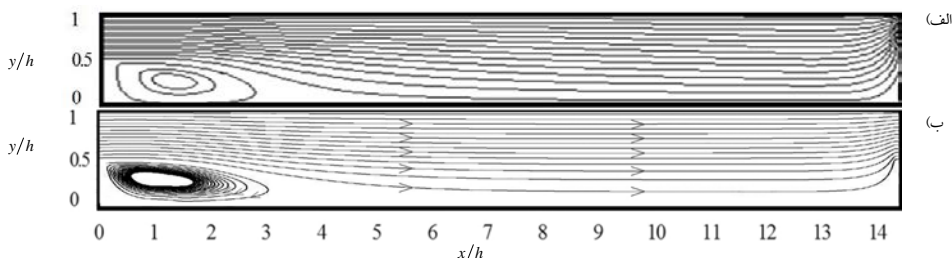
شکل ۳- مقایسه دانه‌بندی ذرات در خروجی حوضچه با نتایج آزمایشگاهی

۴- معرفی هندسه مدل آزمایشگاهی

ابعاد و هندسه کلی مدل این تحقیق برگرفته از مدل آزمایشگاهی موجود در دانشگاه Karlsruhe در آلمان است که توسط Stamou [۱۲] و Tamayol و همکاران [۲۱] استفاده شده است. مدل شامل یک حوضچه طولی به طول ۴۱ متر، ارتفاع کل ۲/۸ متر و ارتفاع ورودی و خروجی ۱/۴ متر می‌باشد (شکل (۴)). مقادیر پیشنهادی برای سرعت حرکت آب داخل حوضچه ترسیب، مقداری کمتر از ۸ سانتیمتر بر ثانیه پیشنهاد شده است [۲۲]. در این تحقیق سرعت جریان براساس عدد رینولدز متوسط ۶۲۰۰۰ محاسبه گردید. لذا با در نظر گرفتن عمق ورودی، سرعت جریان در این مقطع ۴/۴ سانتیمتر بر ثانیه محاسبه شد. در این مدل پس از استخراج مشخصات جریان، ذرات رسوب به مدل وارد شده و با گذشت زمان، ذرات در هر گام ردیابی شده و با توجه به مشخصات جریان در هر نقطه، موقعیت ذره در گام زمانی بعدی پیش‌بینی می‌شود. لازم به ذکر است که در بخش لاگرانژی مدل، هر ذره از ماهیتی مستقل برخوردار بوده و مدل کامپیوتری به هر ذره بخشی از ماتریس محاسباتی را اختصاص می‌دهد. در نهایت با توجه به نحوه حرکت ذرات مدل شده می‌توان به الگویی از انتشار ذرات درون حوضچه ته‌نشینی رسید.



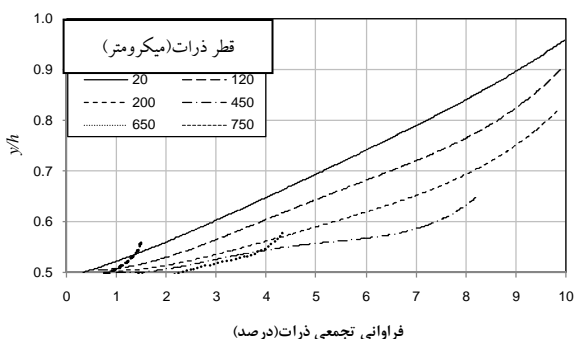
شکل ۴- هندسه مدل مورد مطالعه



شکل ۵- خطوط جریان الف) نتایج مرجع [۲۱] ب) نتایج محاسباتی کار حاضر

مشخص نمود که با افزایش ارتفاع در مقطع خروجی و در هر فاصله از خروجی تا کف حوضچه، چند درصد از ذرات با هر قطری نسبت به مجموع ذرات خروجی، از حوضچه ته‌نشینی خارج می‌شوند. به عنوان مثال میزان خروج ذرات با قطر ۲۰۰ میکرومتر تا ارتفاع ۰/۶ برابر ۵/۵ و تا ارتفاع ۰/۷ برابر ۸ درصد از کل ذرات خارج شده از حوضچه می‌باشد و با توجه به این که در کل ۹/۸ درصد ذرات در مقطع خروجی حوضچه شامل دانه‌های با قطر ۲۰۰ میکرومتر می‌باشند (که حداکثر از ارتفاع $y/h \leq 0.83$ می‌توانند عبور کنند) می‌توان به کمک برون‌یابی و تعمیم تعداد ذرات با این قطر مشخص به ۱۰۰ درصد، مشخص نمود که درصد ذرات عبوری از ارتفاع $y/h \leq 0.6$ و $y/h \leq 0.7$ نسبت به تعداد ذرات با قطر ۲۰۰ میکرومتر به ترتیب برابر ۵۶/۱ و ۸۱/۶ درصد می‌باشد.

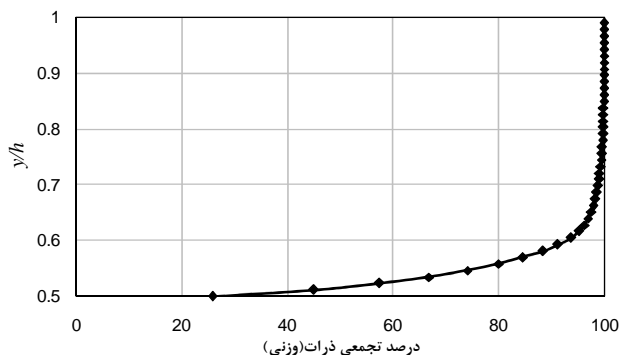
از قابلیت‌های این مدل، ارائه گستره قطر ذرات در هر مقطع و بررسی قطر ذرات در هر عمقی از حوضچه ته‌نشینی می‌باشد.



شکل ۶- فراوانی تجمعی ذرات در خروجی حوضچه

در این شبیه‌سازی، فرض می‌شود که هر ذره علاوه بر سرعتی که جریان در دو جهت افقی و قائم به آن دیکته می‌کند، دارای سرعت سقوط بدست آمده از معادله دینامیکی حاکم بر ذره می‌باشد. نخست مقطع خروجی حوضچه ته‌نشینی به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده و فرض می‌شود آب خام که دارای توزیع یکنواختی از ذرات معلق می‌باشد از ورودی مخزن که در مقطع $x/h = 0$ و $0.5 \leq y/h \leq 1$ واقع شده، وارد حوضچه شود. آنگاه با توجه به شدت بار رسوبی آب، تعداد ذراتی که از هر بازه در واحد زمان عبور می‌کند محاسبه می‌شود. سپس تعدادی از ذرات معلق طی فرآیند انتقال، تله افتادگی و ته‌نشینی، خود را به مقطع خروجی که در موقعیت $x/h = 14.6$ و $0.5 \leq y/h \leq 1$ قرار دارد می‌رسانند. با توجه به مدل‌سازی حرکت ذرات رسوب به صورت لاگرانژی در این مطالعه، می‌توان هر ذره را به طور مستقل ردیابی کرده و موقعیت آن را در هر لحظه مشخص نمود. لذا با بررسی تعداد ذرات عبوری از مقطع خروجی حوضچه ته‌نشینی، می‌توان تعداد ذراتی که از این مقطع با هر قطری و از هر تراز عبور می‌کنند را به دست آورد.

فراوانی ذرات در خروجی به تفکیک قطر ذرات، نسبت به ارتفاع برای ۶ نمونه از ذرات در شکل (۶) ارائه گردیده است. این نمودار با توجه به تعداد کل ذرات خارج شده از حوضچه ته‌نشینی بدون بعد شده است. محور افقی نمودار نشان دهنده فراوانی تجمعی ذرات خارج شده از حوضچه می‌باشد. از کل ذرات موجود در مقطع خروجی، ۱۰ درصد ذرات دارای قطر ۲۰ میکرومتر بوده و ۴ درصد ۶۵۰ میکرومتر هستند که این ذرات به تفکیک قطر و به صورت جداگانه وارد حوضچه می‌شوند. یعنی با افزایش قطر درصد ذرات خارج شده از حوضچه کاهش می‌یابد که این امر گویای افزایش راندمان تله‌اندازی رسوب با افزایش قطر ذرات می‌باشد. از طرفی با بررسی این شکل می‌توان

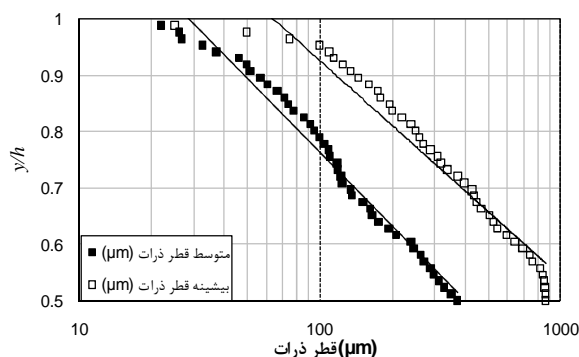


شکل ۸- توزیع وزنی تجمعی ذرات در خروجی

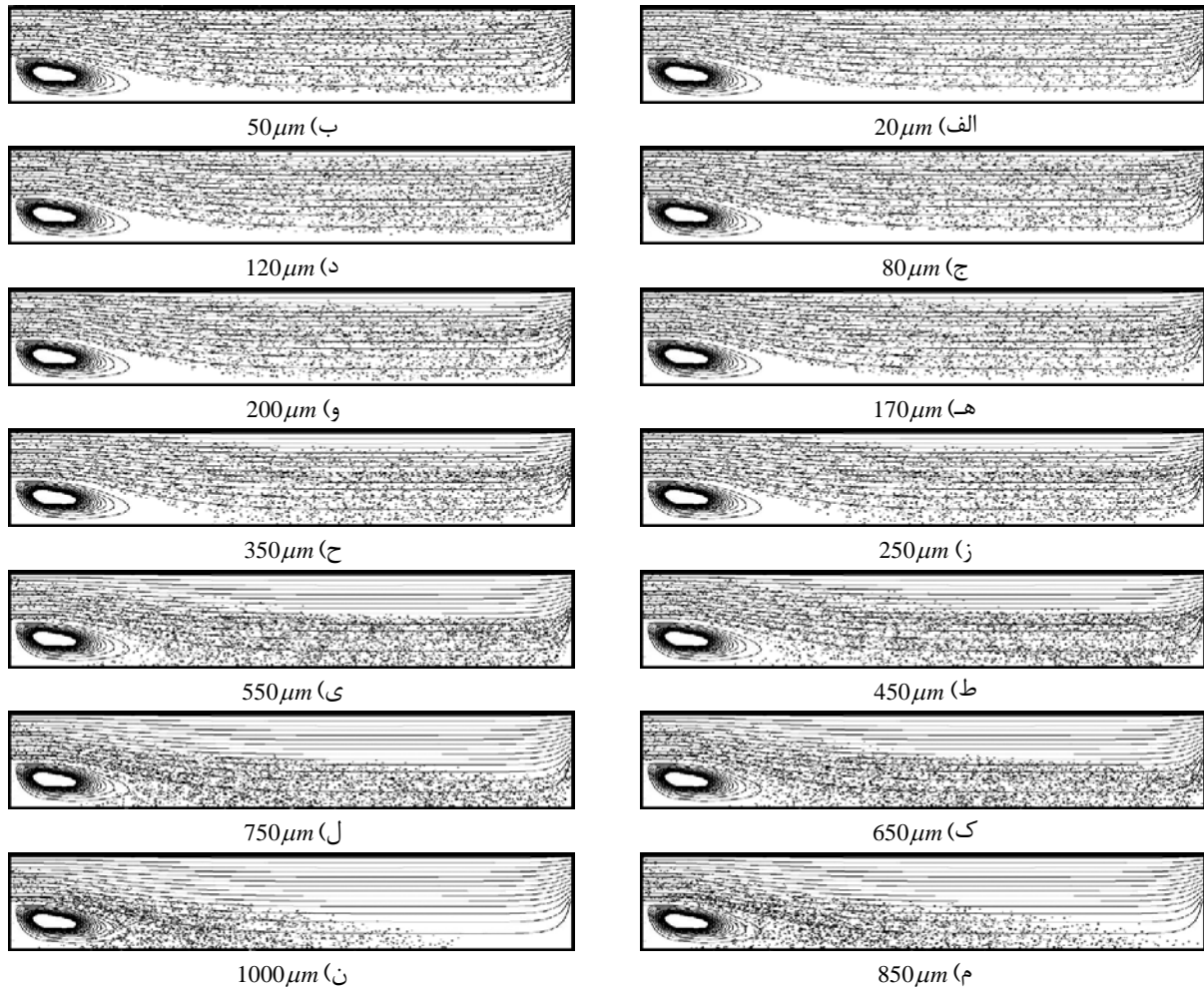
همان گونه که در این اشکال مشاهده می‌شود با افزایش قطر ذرات، دانه‌های رسوب از ترازهای پایین‌تری از مقطع خروجی عبور می‌کنند. به عنوان مثال، ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر از تمام مقطع خروجی کانال خارج می‌شوند، در حالی که با توجه به شکل (۶) ذرات با قطر ۷۵۰ میکرومتر حداکثر می‌توانند از $y/h = 0.58$ خارج شوند. لذا با ترکیب ذرات با قطرهای مختلف، در مجموع وزن و قطر ذرات در کف کانال خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به این که مقدار وزنی ذرات، مجموع حاصل ضرب تعداد ذرات در وزن هر ذره می‌باشد و خروج ذرات با قطر و تعداد بیشتر از اعماق پایین‌تر رخ می‌دهد، تمرکز وزنی در نواحی نزدیک به کف خروجی بسیار بیشتر می‌باشد و همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، حدود ۹۰ درصد رسوبات خارج شده از حوضچه، از ۲۰ درصد پایین مقطع خروجی، خارج می‌شوند.

ذرات رسوب به صورت تصادفی و با توزیع نرمال در ترازهای مختلفی از مقطع ورودی به حوضچه وارد می‌شوند. در روند حرکت ذرات، با توجه به قطر تعدادی از آنها ته‌نشین شده و تعداد دیگری از حوضچه خارج می‌شوند. این روند پس از مدتی به پایداری رسیده و تعداد ذرات خروجی از حوضچه در بازه‌های زمانی مشخص به مقدار ثابتی می‌رسد که در هر حال کسری از تعداد ذرات ورودی می‌باشد. شکل (۹) حالت گسترش یافته و پایدار توزیع ذرات را برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل خطوط جریان انتظار می‌رود که در صورت ورود ذره‌ای فرضی با قطر صفر از هر عمقی از ورودی حوضچه، این ذره مسیر خطوط جریان با منشأ مقطع ورودی را طی کرده و از خروجی حوضچه خارج شود. لذا راندمان تله‌اندازی برای چنین ذره‌ای صفر درصد می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای ذرات با قطر بسیار کوچک (۲۰ میکرومتر)، چنین فرآیندی رخ می‌دهد.

شکل (۷) گستره قطری ذرات را در خروجی حوضچه با توجه به ارتفاع در این مقطع ارائه می‌نماید. همان طور که انتظار می‌رود، در ارتفاعات کمتر روی دریاچه خروجی، قطر ذراتی که می‌توانند از این مقطع عبور کنند بیشتر می‌شود. با اطلاع از نحوه خروج ذرات با دانه‌بندی‌های مختلف در مقطع خروجی، می‌توان برای افزایش راندمان تله‌اندازی، کنترل حداکثر قطر ذرات خارج شده از حوضچه و طراحی بهینه حوضچه ته‌نشینی تمهیداتی را در نظر گرفت. در این شکل علاوه بر دانه‌بندی متوسط قطر ذرات در خروجی، بیشینه قطر ذرات که توانایی خروج از حوضچه را دارند نسبت به ارتفاع، آورده شده است. به کمک این نمودار می‌توان قطر بزرگترین ذراتی را که در هر ارتفاع توانایی خروج دارند پیش‌بینی کرد. به عنوان مثال می‌توان گفت که ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر می‌توانند از تمام عمق مقطع خروجی خارج شوند در حالی که ذرات با قطر ۴۰۰ میکرومتر تنها می‌توانند از $y/h \leq 0.7$ خارج شوند که این مفهوم با توجه به نمودار مربوط به بیشینه قطر ذرات که می‌توانند از هر تراز خارج شوند مشخص می‌شود. با توجه به این که در ترازهای پایین‌تر در مقطع خروجی، گستره بیشتری از ذرات خارج می‌شوند لذا می‌توان به طور متوسط قطر ذراتی را که در هر تراز از حوضچه ته‌نشینی خارج می‌شوند به دست آورد. به عنوان مثال در تراز ۰/۷ که بیشینه قطر ۴۰۰ میکرومتر توانایی خروج از حوضچه را دارد، توأمأ ذرات با قطر کوچک‌تر نیز می‌توانند عبور کنند که قطر ذرات عبوری از این تراز به طور متوسط برابر ۱۵۰ میکرومتر می‌باشد. شکل (۸) توزیع وزنی ذرات را به صورت تجمعی در مقطع خروجی حوضچه ته‌نشینی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ترازهای پایین‌تر، درصد وزنی بیشتری از ذرات از حوضچه خارج می‌شوند؛ لذا می‌توان چنین برداشت کرد که در ترازهای پایین‌تر، غلظت رسوبات بالاتر می‌باشد. این پدیده با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) قابل تفسیر است.



شکل ۷- گستره قطری ذرات در خروجی



شکل ۹- وضعیت گسترش یافته ذرات در حوضچه ترسیب در حالت پایدار

ذرات با قطرهای مختلف متفاوت است. از طرفی، میزان سرعت پیشروی و گسترش ذرات ارتباطی معکوس با قطر ذرات دارد به طوری که با افزایش قطر ذرات رسوب، حرکت آنها به جلو کاهش یافته و در مقابل سرعت ته‌نشینی ذرات افزایش می‌یابد.

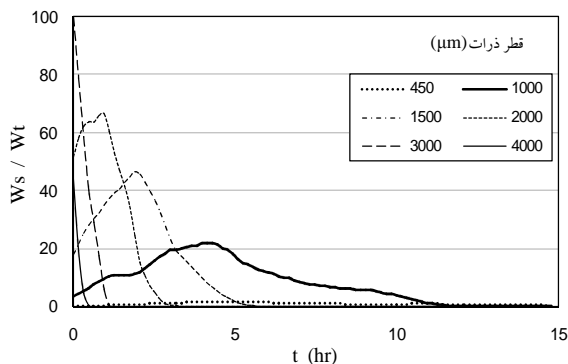
همان طور که در شکل (۹) به وضوح مشاهده می‌شود تراکم خطوط جریان در سطح حوضچه نسبت به ترازهای پایین‌تر آن بیشتر است که این امر نشان دهنده کاهش سرعت افقی جریان در ترازهای پایین نسبت به نواحی بالاتر حوضچه است. از این رو این ذرات در زمان طولانی‌تری به انتهای حوضچه می‌رسند.

۵-۲- بررسی دانه‌بندی رسوبات در کف حوضچه ته‌نشینی

برای تعیین نحوه ته‌نشین شدن ذرات، مقداری رسوب در ۲۰ رده قطری از ۲۰ تا ۵۰۰۰ میکرومتر و به صورت مجزا برای هر قطر از ذرات به حوضچه تزریق شد و پس از رسیدن به حالت تعادل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تعداد ذرات ته‌نشین شده، می‌توان وضعیت قطر ذرات را در کف حوضچه به دست

یعنی ذرات از یک سمت وارد شده و بدون به تله افتادن در نواحی چرخشی و یا ته‌نشینی، از سمت دیگر حوضچه خارج می‌شوند. با توجه به نتایج بدست آمده، این روند تا قطر ۲۰۰ میکرومتر ادامه دارد. با ادامه افزایش قطر، به تدریج ذرات از مسیر خطوط جریان خارج شده و به سمت پایین کشیده می‌شوند. این پدیده در قطرهای ۲۵۰ میکرومتر به بالا در شکل (۹) قابل مشاهده است. با ادامه افزایش قطر ذرات به تدریج سرعت سقوط بیشتر می‌شود، به گونه‌ای که ذرات رسوبی در نواحی ابتدایی‌تر، از خطوط جریان جدا شده و وارد ناحیه چرخشی ابتدای حوضچه می‌شوند. این پدیده را می‌توان در قطرهای بالاتر از ۴۵۰ میکرومتر مشاهده کرد.

با دقت در این اشکال مشاهده می‌شود که ذرات با قطر مشخص محدوده خاصی از مخزن را به خود اختصاص می‌دهند. به عبارت دیگر برای هر قطری از ذرات یک خط پوش قابل تشخیص است که در بالای آن هیچ ذره‌ای از آن قطر قرار ندارد و یا به علت تبعیت از خطوط جریان در برخی نواحی غلظت



شکل ۱۱- تعداد ذرات ته‌نشین شده در طول حوضچه

لذا بیشینه تعداد ذرات رسوب کرده در این گستره قطری، در ناحیه بین فضای مرده حوضچه و خطوط موازی جریان قرار دارد. با توجه به این که با افزایش قطر ذرات، جرم ذرات نیز افزایش می‌یابد، می‌توان مشاهده نمود که به تدریج اثرات ناحیه چرخشی نیز روی روند ته‌نشینی کم شده و از حدود ۳۰۰۰ میکرومتر تقریباً به صفر می‌رسد. این واقعیت را می‌توان با توجه به شکل (۱۱) به وضوح مشاهده کرد؛ چرا که در قطرهای بالای ۳۰۰۰ میکرومتر، قله نمودار به ابتدای حوضچه منتقل شده و از اثرات چرخشی پیروی نمی‌کند. در این شکل w_p/w_r نشان دهنده نسبت وزن رسوبات ته‌نشین شده در هر قطر به کل رسوبات ورودی می‌باشد. با توجه به این که در قطرهای کمتر، اکثر ذرات از حوضچه خارج می‌شود، لذا تعداد بسیار کمی از ذرات ته‌نشین می‌شود. بنابراین نمودار ذرات با قطرهای کم، به صفر نزدیک است.

۵-۳- برآورد راندمان تله‌اندازی حوضچه ته‌نشینی

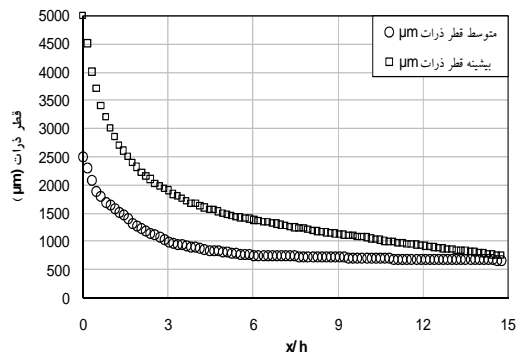
با داشتن تعداد ذرات خروجی از حوضچه، می‌توان راندمان تله‌اندازی حوضچه ته‌نشینی را با توجه به دانه‌بندی ذرات در ورودی به دست آورد. مقدار بار رسوبی ته‌نشین شده در این مطالعه تحت عنوان راندمان تله‌اندازی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه گردید [۵]:

$$Te = \frac{S_i - S_o}{S_i} \times 100 \quad (6)$$

که در این رابطه Te راندمان تله‌اندازی و S_i و S_o به ترتیب میزان غلظت متوسط رسوبات ورودی و خروجی در واحد زمان از حوضچه ته‌نشینی می‌باشد.

آورد. همچنین با توجه به داده‌های حاصل از برنامه می‌توان بیشینه قطری را که در هر فاصله از ابتدای حوضچه ته‌نشینی می‌تواند ته‌نشین شود، پیش‌بینی کرد. شکل (۱۰) وضعیت قطر ذرات را در کف حوضچه و در طول حوضچه نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با دور شدن از ابتدای حوضچه متوسط قطر ذرات کاهش می‌یابد. باید توجه نمود که ذرات درشت دانه مسافتی را به صورت معلق بدون ته‌نشینی می‌توانند در طول حوضچه بپیمایند. به کمک این شکل می‌توان مشاهده نمود که به عنوان مثال ذرات با قطر ۱۵۰۰ میکرومتر حداکثر تا فاصله $x/h \approx 6$ مشاهده می‌شوند و می‌توان انتظار داشت که ادامه حوضچه ته‌نشینی اثری از ذرات با این قطر مشاهده نشود. باید در نظر داشت که در همین فاصله از ابتدای حوضچه، ذرات با قطرهای کمتر از ۱۵۰۰ میکرومتر نیز می‌توانند ته‌نشین شوند. لذا میانگین قطر ذرات ته‌نشین شده در این فاصله مقداری کمتر از ۱۵۰۰ میکرومتر و برابر ۷۵۰ میکرومتر می‌باشد.

برای تعیین نحوه پخش ذرات در کف حوضچه، ذرات در ۲۰ رده قطری و به صورت مجزا به حوضچه تزریق شدند. شکل (۱۱) نشان دهنده درصد وزنی ذرات ته‌نشین شده در این مدت و در فواصل صفر تا ۱۴/۶ h است. در گستره ۲۰ تا ۸۵۰ میکرومتر روند ته‌نشینی نسبتاً یکنواخت بوده و ذرات در تمام طول حوضچه پخش شده‌اند. با افزایش قطر تا ۲۵۰۰ میکرومتر، روند ته‌نشینی ذرات به تدریج به سمت ابتدای حوضچه متمایل می‌شود؛ اما در این گستره قطری می‌توان مشاهده کرد که قله‌ای که نشان از بیشینه تعداد ذرات رسوب کرده در هر قطر دارد، در حد فاصل ۱ تا ۳ برابر ارتفاع بوجود می‌آید. می‌توان چنین برداشت کرد که با افزایش قطر در گستره تقریبی ۸۵۰ تا ۲۵۰۰ میکرومتر، با وجود این که ذرات تمایل به ته‌نشینی در ابتدای حوضچه دارند اما روند حرکت و ته‌نشینی آن‌ها متأثر از ناحیه چرخشی ابتدای حوضچه که در شکل (۵) قابل مشاهده است نیز می‌باشد.



شکل ۱۰- گستره قطری ذرات ته‌نشین شده در طول حوضچه

ذکر شده، تقریباً تمامی ذرات با قطر بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر به تله می‌افتند. از طرفی با استفاده از منحنی برازش داده شده بر اطلاعات حاصل از مدل برآوردی از راندمان تله‌اندازی در گستره ۲۰ تا ۸۵۰ میکرومتر پیش‌بینی شده است.

۷- مراجع

- [1] Larsen, P., "On the Hydraulics of Rectangular Settling Basins", Report No. 1001, Department of Water Research Engineering, Lund Institute of Technology, 1977.
- [2] Shamber, D. R., Larock, B. E., "Numerical Analysis of Flow in Sedimentation Basins", Journal of Hydraulic Division, 1981, 107 (HY5), 575-591.
- [3] Long, F., Xu, N., Ke, X., Shi, H., "Numerical Simulation of Secondary Sedimentation Tank for Urban Wastewater", Chemical Engineering Journal, 2007, 38, 425-433.
- [4] McCorquodale, J. A., Zhou, S., "Effects of Hydraulic and Solids Loading on Clarifier Performance", Journal of Hydraulic Research, 1993, 31, 461-477.

[۵] سجادی، م.، شفاعی‌بجستان، م.، بینا، م.، "ارزیابی مدل‌های طراحی حوضچه‌های رسوبگیر آبیاری"، نشریه آب و خاک، ۲۰۰۹، ۲۳ (۳)، ۱۱۰-۱۲۱.

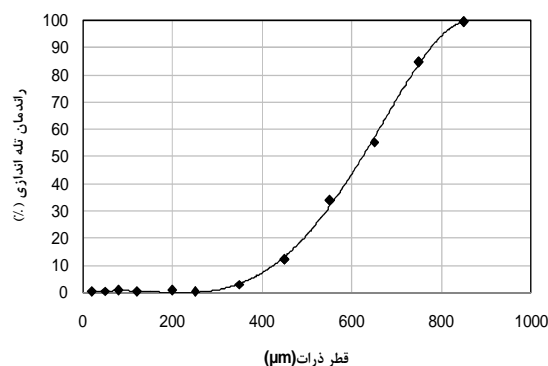
[۶] خادمی، م.، امید، م. ح.، هورفر، ع.، "بررسی اثر تیغه هدایت کننده بر راندمان تله‌اندازی حوضچه‌های رسوبگیر با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی"، مجله هیدرولیک، ۱۳۸۶، شماره بهار، ۱۱-۲۴.

[۷] شفاعی‌بجستان، م.، خمینی‌بزاز، م.، "بررسی توزیع طولی و عمقی غلظت و دانه‌بندی رسوب معلق در کانال‌های آبیاری"، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان آب و برق خوزستان، ۱۳۸۷.

- [8] Maxey, M. R., "On the Advection of Apherical and Non-Spherical Particles in a Non-Uniform Flow", Philosophy Transaction Royal Society London Academy, 1990, 333, 289-307.
- [9] Nielsen, P., "Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport", World Scientific, Singapore, 1992, pp 324.
- [10] Stovin, V. R., Saul, A. J., "Computational Fluid Dynamics and the Design of Sewage Storage Chambers". J.CIWEM, 14~21, 103-110, 2000.
- [11] Al-Sammarraee, M., Chan, A., Salim, S. M., Mahabaleswar, U. S., "Large-Eddy

شکل (۱۲) راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب را با توجه به قطر آن‌ها نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با کاهش قطر ذرات به ۲۵۰ میکرومتر، شیب نمودار کم می‌شود.

به عبارت دیگر، در قطرهای کمتر از ۲۵۰ میکرومتر، در حوضچه‌ای با مشخصات ذکر شده، راندمان تله‌اندازی رسوب تغییر چندانی نمی‌کند و به ۰٪ محدود می‌شود. از طرفی با برازش منحنی بر این داده‌ها، می‌توان مشاهده کرد که در قطرهای بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر راندمان تله‌اندازی حوضچه به ۱۰۰ درصد می‌رسد و این موضوع در هماهنگی کامل با شکل (۹) می‌باشد.



شکل ۱۲- راندمان تله‌اندازی ذرات رسوب

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مطالعه روی حوضچه ته‌نشینی طولی در یک مدل دو بعدی اولری- لاگرانژی انجام شد. پس از استخراج خطوط جریان به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، ذرات رسوب در ورودی با توزیعی یکنواخت و به صورت دانه‌ای و مستقل از یکدیگر با حرکتی لاگرانژی وارد حوضچه شده و ادامه حرکت آن‌ها با تبعیت از اثرات جریان سیال، وزن ذرات، نیروهای سبک‌کنندگی و رانش، درون حوضچه تصویر شد. در این مقاله با استفاده از روش یاد شده، دانه‌بندی رسوبات در کف و خروجی حوضچه مورد بررسی قرار گرفت و رسوبات به تفکیک قطر ذرات ته‌نشین شده و همچنین درصد ذرات رسوبی در هر رده قطری بر اساس فاصله از شروع حوضچه بررسی شد. همچنین دانه‌بندی ذرات خروجی از حوضچه و درصد ذرات هر رده قطری نیز بر اساس ارتفاع از کف کانال خروجی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با استفاده از برون‌یابی تابع حاصل از راندمان تله‌اندازی رسوب، مشخص گردید که در حوضچه‌ای با شرایط

- University of Technology, Tehran, Iran, 2003.
- [17] Sagaut, P., "Large Eddy Simulation for Incompressible Flows", Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [18] Salvetti, M. V., "Investigation of the Effect of Numerical Discretization and Physical Modeling in Reduced-Order Simulation of Turbulent Flows", PhD Thesis in Aerospace Engineering, University of Pisa, 2001.
- [19] Rubey, W. W., "Equilibrium-Conditions in Debris-Laden Streams", Transactions of American Geophysics Union, 1933.
- [20] Vanoni, V. A., "Sedimentation Engineering", ASCE Task Committee, Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of Hydraulic Division, 2006.
- [21] Tamayol, A., Firoozabadi B., Ahmadi, G., "Determination of Settling Tanks Performance Using an Eulerian Lagrangian Method", Journal of Applied Fluid Mechanics, 2008, 1, (1), 43-54.
- [22] DE Clercq, B., "Computational Fluid Dynamics of Settling Tanks: Development of Experiments and Rheological, Settling, and Scraper Sub-Models", PhD Thesis in Applied Biological Sciences, University of Gent, 2003.
- Simulations of Particle Sedimentation in a Longitudinal Sedimentation Basin of a Water Treatment Plant. Part I: Particle Settling Performance", Chemical Engineering Journal, 2009, 152, 307-314.
- [12] Stamou, A., "Optimizing the Design of Secondary Clarifiers Using Mathematical Models", Proceedings of the 4th Int. Conf. on Water Pollution: Modeling, Measuring and Prediction, Bled, pp. 681-690, 1997.
- [13] Imam, E., McCorquodale, J. A., Bewtra, J. K., "Numerical Modeling of Sedimentation Tanks", Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 109 (12), 1740- 1754.
- [14] Adams, E. W., Rodi, W., "Modeling Flow and Mixing in Sedimentation Tanks", Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (7), 895-913.
- [15] Stamou, A., Katsiris, I., Georgiadis, S., Kanellopoulou, S., Tzoumerkas, F., Xenos, D., "Improving the Efficiency of Existing Water Process Tanks Using Flow Through Curves-FTCs- and Mathematical Models", International Conference on Environmental Science and Technology, Syros, Greece, 2001.
- [16] Ashjari, M. A., "Numerical Modeling of Settling Tanks", MSc Thesis, Sharif